

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN TECHNOLOGIE DES SYSTÈMES
M.Ing.

PAR
JEAN-PHILIPPE BLOUIN

RECONSTRUCTION 3D D'ENVIRONNEMENT SOUS-MARIN PAR SONAR

MONTREAL, LE 10 JANVIER 2005

© droits réservés de Jean-Philippe Blouin

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Mohamed Cheriet, directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée
École de technologie supérieure

M. Jacques-André Landry, président du jury, maître de conférence et professeur
Département de génie de la production automatisée
École de technologie supérieure

M. Alain Croteau, examinateur externe et chercheur
unité Automatisation et systèmes de mesures
Institut de recherche électrique du Québec

IL A FAIT L'OBJET D'UNE PRÉSENTATION DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 15 DÉCEMBRE 2004

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

RECONSTRUCTION 3D D'ENVIRONNEMENT SOUS-MARIN PAR SONAR

Jean-Philippe Blouin

SOMMAIRE

L'Institut de recherche d'Hydro-Québec a développé un mini sous-marin d'inspection offrant au pilote une représentation virtuelle simultanée du site comme aide à la navigation. Souvent, le modèle de référence est incomplet et demande l'ajout de sections de géométries qui sont mal représentées sur les plans originaux.

Ce mémoire s'intéresse à trois aspects de la reconstruction en géométrie 3D d'objets : la prise de mesures référencées, la structuration de ce nuage de points en une représentation 3D virtuelle et l'unification de segments de géométrie afin d'obtenir l'objet 3D complet.

La première partie du mémoire présente la problématique de la prise de mesures tridimensionnelles référencées et leur degré de précision. Une brève revue de littérature permet d'exposer quelques notions théoriques de la propagation acoustique dans l'eau, de montrer l'impact de ces éléments sur les mesures sonar, et de mettre en place une simulation 3D virtuelle du sonar. L'aspect de l'amélioration de la qualité des mesures par certains types de filtrage est également introduit. Finalement, la chaîne complète des référentiels impliqués est présentée.

La seconde partie expose la problématique associée à la représentation virtuelle d'un objet. Une brève revue de littérature présente les modèles de représentation les plus couramment utilisés, ainsi que leurs méthodes associées de formation à partir des données. Dans ce travail, une représentation surfacique a été proposée, laquelle est obtenue par différentes méthodes d'établissement de la connectivité des points qui seront présentées de façon détaillée. Cette partie aborde également la problématique de l'unification de segments de géométrie 3D afin d'obtenir une vue complète de l'environnement immédiat du sous-marin. Une dernière revue de littérature montre quelques méthodes actuelles et l'algorithme de celle retenue est expliquée.

Finalement, des résultats de reconstruction (à la fois par simulation et mesures sur le terrain) sont présentés afin de valider et d'évaluer la performance du processus de reconstruction.

REMERCIEMENTS

Mener à terme un tel travail de recherche ne dépend pas uniquement de l'auteur de ces lignes, mais également du support constant, et très apprécié, de plusieurs personnes impliquées de près ou de loin. Il peut s'agir des conseils et de l'assistance technique des collègues, ou encore du support moral essentiel au succès d'une telle entreprise. Je profite de cette occasion pour remercier ces gens chaleureusement.

J'aimerais offrir ma reconnaissance à mon directeur de maîtrise, Dr Mohamed Cheriet qui, par son aide et ses commentaires judicieux, a su insuffler un esprit de clareté et de justesse dans tous les aspects de mes travaux. Par la même occasion, je tiens à souligner le support financier du CRSNG par la bourse ESII-2, de même que l'octroi d'une Bourse Interne provenant de l'ETS.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury, Jacques-André Landry et Alain Croteau, qui ont accepté la tâche d'évaluer la pertinence de cette recherche.

Je veux tout particulièrement remercier mes collègues de l'unité Automatisation et systèmes de mesures de l'IREQ, projet véhicule sous-marin d'inspection. D'abord Michel Blain, qui m'a confié cette partie du développement du sous-marin; Régis Houde, qui m'a familiarisé avec l'architecture informatique du système (et la librairie MICROB en particulier); et Alain Croteaux, pour m'avoir aidé et soutenu dans l'élaboration de mon projet et de son

intégration au poste de commande. Également, j'aimerais souligner les enrichissantes conversations et les conseils reçus de la part de Serge Sarraillon et de Luc Provencher.

Je voudrais également remercier l'Institut national d'optique (INO) de m'avoir autorisé l'accès au mémoire de Marc Fournier : « Fusion de données 3D provenant d'un profilomètre tenu à la main ». Ses recherches et sa revue de littérature sur l'unification de surfaces ont été une bonne introduction au domaine et un point de départ utile pour ma propre recherche bibliographique.

Finalement, ma gratitude va aux membres de ma famille. À mon fils Maël, source d'inspiration et de courage. À ma chère Nathalie, pour sa patience et sa compréhension tout au long de mes années d'études et de mes nombreuses longues soirées de travail, de même que pour ses innombrables suggestions quand à la qualité de ce texte. J'apprécie également les encouragements reçus de la part de mes parents et amis.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	III
REMERCIEMENTS	IV
TABLE DES MATIÈRES	VI
LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES GRAPHIQUES	XVI
LISTE DES PHOTOS	XVIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XIX
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
PREMIÈRE PARTIE : MESURES ACOUSTIQUES RÉFÉRENCÉES	14
INTRODUCTION	15
CHAPITRE 1 : PROBLÉMATIQUE ET ÉQUIPEMENT SONAR	17
1.1 Problématique	17
1.2 Sonar SM 2000 ECHO SOUNDER	18
1.3 Architecture logicielle de la station de commande et flots d'information	22
CHAPITRE 2 : REVUE DE LITTÉRATURE ET SOMMAIRE THÉORIQUE	24
2.1 Principe de fonctionnement du sonar	24
2.1.1 Phénomènes environnementaux	25
2.1.2 Propagation de l'onde acoustique	29
2.1.3 Bruits et réverbération	35
2.1.4 Performance du sonar	36
2.2 Indice de confiance des données sonar	36
2.2.1 Précision longitudinale des mesures de distance	37
2.2.2 Précision latérale des mesures de distance	38
2.2.3 Précision transversale des mesures de distance	39
2.2.4 Précision acoustique totale	39
2.3 Discussion	40
Principales contributions personnelles	40
CHAPITRE 3 : SYSTÈME DE POSITIONNEMENT ET DONNÉES SONAR	
RÉFÉRENCÉES	41

3.1	Position 3D d'une mesure sonar	42
3.2	Installation du sonar sur le sous-marin	43
3.3	Position et orientation du sous-marin	44
3.3.1	Équipements utilisés et leur précision respective	45
3.3.2	Combinaison du système de localisation acoustique et des autres capteurs	48
3.4	Précision des mesures référencées	49
3.5	Transformation des coordonnées spatiales	50
3.6	Discussion	51
CHAPITRE 4 : FILTRAGE DES DONNÉES SONAR BRUTES		52
4.1	Filtrage du bruit impulsionnel	56
	Modifications au médian classique	61
4.2	Filtrage du bruit de surface	65
	Remplissage des données manquantes	65
	Effet de bord	65
	Méthodes investiguées	66
4.2.1	Segmentation des profils	76
4.2.1.1	Détection des discontinuités	77
4.2.1.2	Effet de la largeur du cône de réception sur la détection des discontinuités ...	81
4.2.2	Comparaison des filtres et présentation globale du processus de filtrage	85
	Filtre gaussien adaptatif	87
	Filtre Wiener	88
4.2.3	Comparaison de tous les filtres étudiés	89
4.3	Discussion	92
	Principales contributions personnelles	92
CHAPITRE 5 : SIMULATION SONAR ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE		93
5.1	Simulation	94
5.1.1	Engin de simulation 3D	94
5.1.2	Trajectoires des ondes acoustiques	94
5.1.3	Bruits	95
	Bruit impulsionnel	95
	Bruit de surface	96
5.2	Validation des paramètres acoustiques	101
5.3	Démonstration de l'effet du filtrage sur les données brutes	102
5.4	Discussion	107
CONCLUSION ET DISCUSSION		108
DEUXIÈME PARTIE : RECONSTRUCTION DE SURFACES		110
INTRODUCTION		111
CHAPITRE 6 : DÉFINITION DE LA PROBLÉMATIQUE		113

6.1	Problématique	113
6.1.1	Superposition des données et redondance	113
	Superposition locale	113
	Superposition distante	114
6.1.2	Segmentation des profils	115
6.1.3	Densité des données	116
6.1.4	Symbolisme visuel	116
6.1.5	Point de vue	117
6.2	Revue de littérature	117
6.2.1	Méthodes de reconstruction de surfaces	117
6.2.2	Méthodes d'unification de surfaces	123
6.3	Discussion	126

CHAPITRE 7 : APPROCHE PROPOSÉE ET DÉVELOPPEMENT

	ALGORITHMIQUE DE LA SOLUTION	127
7.1	Approche proposée	127
7.1.1	Contraintes et conditions d'opération	127
7.1.1.1	Superposition des données	127
	Superposition locale	127
	Superposition distante	128
7.1.1.2	Représentation des lacunes géométriques	129
	Connectivité des discontinuités	130
	Connectivité des trous	130
	Connectivité du manque de densité de données	131
	Connectivité des triangles de bruit impulsionnel	131
7.1.2	Point de vue	132
7.1.3	Connectivité entre les points	132
7.1.4	Connectivité simple	134
7.1.4.1	Décalage transversal des scans et « point équivalent »	135
7.1.5	Connectivité par projection 2D	136
7.1.6	Connectivité générale	138
7.2	Développement algorithmique	138
7.2.1	Algorithme de connectivité simple	143
7.2.2	Algorithme par projection 2D	144
7.3	Discussion	146
	Principales contributions personnelle	146

CHAPITRE 8 : RECONSTRUCTION GLOBALE 148

8.1	Reconstruction par simulation bruitée	148
	Simulation idéale	149
	Simulation bruitée sans filtrage	153
	Simulation bruitée avec filtrage impulsionnel	154
	Simulation bruitée avec filtrages impulsionnel et de surface	157

8.2	Reconstruction de données réelles	158
	Bassin St-Bruno	158
	Quai Bikerdike du port de Montréal	162
8.3	Discussion	166
CHAPITRE 9 : UNIFICATION DE SURFACES		168
9.1	Méthode surfacique par diagramme de Venn	170
9.2	Méthode implicite	170
9.3	Discussion	171
	Principale contribution personnelle	171
CONCLUSION GÉNÉRALE		172
RECOMMANDATIONS		174
	Mesures sonar référencées	174
	Simulation acoustique	175
	Filtrage des données sonar brutes	176
	Reconstruction de surfaces	177
TABLEAUX :		
Tableau I	Profondeur de parcours de différentes trajectoires à partir d'une position initiale de -50 m	33
Tableau II	MSE du filtrage du bruit de surface à l'aide de différents filtres	89
BIBLIOGRAPHIE		179

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 : Affichage virtuel d'une surface de barrage avec son sous-marin synchronisé en position	4
Figure 2 : Représentation de la problématique de ce projet : reconstruction de surfaces à partir de profils de points 3D accumulés par balayage	5
Figure 3 : Représentation du procédé complet	10
Figure 4 : Présentation des sections du document	13
Figure 5 : Géométrie des rayons du sonar et axes de son référentiel polaire	19
Figure 6 : Reconstitution cartésienne des amplitudes sonar	21
Figure 7 : Reconstitution cartésienne des positions de seuils retournées	21
Figure 8 : Composantes logicielles et flots d'information	23
Figure 9 : Organisation hiérarchique des différents phénomènes acoustiques	25
Figure 10 : Aspect géométrique de la loi de Snell	29
Figure 11 : Secteur sphérique de la précision acoustique totale	39
Figure 12 : Référentiels utilisés dans le calcul d'une position 3D globale	42
Figure 13 : Paramètres impliqués lors de la conversion d'une mesure de distance sonar en position 3D	42
Figure 14 : Géométrie de disposition des balises du système AquaMap	46
Figure 15 : Relation de translation et de rotation entre deux référentiels	50
Figure 16 : Données sonar telles que vues par l'opérateur du sous-marin et profil cartésien erroné obtenu à partir de ces informations brutes	53
Figure 17 : Différence de la couleur des points lors de la présence de bruit impulsionnel dans un scan	55
Figure 18 : Représentation graphique du choix de facteur de « différence minimale »	62
Figure 19 : Différence entre le bruit impulsionnel et une discontinuité positive de profondeur dans un scan sonar	63
Figure 20 : Représentation graphique de discontinuités de niveau 0	76
Figure 21 : Représentation graphique de discontinuités de niveau 1	77

Figure 22 : Scan sonar idéal, profil des distances en « faux polaire » et référencées 2D	78
Figure 23 : Représentation multicolore des segments identifiés dans un profil déjà filtré pour éliminer le bruit impulsionnel	80
Figure 24 : Élongation longitudinale des mesures par perspective	81
Figure 25 : Triangle de compensation de la perspective	82
Figure 26 : Profil sonar avec élongation des distances par perspective : profil en « faux polaire » et segmentation cartésienne erronée	83
Figure 27 : Zones de contre-validation d'une fausse discontinuité dû à la perspective	84
Figure 28 : Segmentation correcte en présence de perspectives par le test de détection généralisé des discontinuités	85
Figure 29 : Processus complet de filtrage des données d'un scan	91
Figure 30 : Schéma montrant le flot de données du simulateur sonar en remplacement du système réel	93
Figure 31 : Profils des probabilités normales du bruit de surface en fonction de la distance radiale à l'origine	97
Figure 32 : Représentation 3D de la prise d'eau du barrage LG2A et prise de mesure d'un profil en particulier	99
Figure 33 : Ajout de bruits « poivre et sel » et gaussien de différents niveaux aux mesures de distances idéales et démonstration de l'effet de la distance sur la quantité de bruit impulsionnel	100
Figure 34 : Empilage des profils d'un balayage de fond marin, en version cartésienne, agrandie d'une section, fausse polaire, et trois des profils sélectionnés	101
Figure 35 : Démonstration du filtrage impulsionnel à l'ajout de bruits « poivre et sel » et gaussien de différents niveaux aux mesures de distances idéales	103
Figure 36 : Démonstration du filtrage de surface à l'ajout de bruits « poivre et sel » et gaussien de différents niveaux aux mesures de distances idéales	104
Figure 37 : Démonstration du filtrage impulsionnel à partir de certains profils de données réelles d'un balayage de fond marin et d'une estimation des conditions de bruit	105

Figure 38 : Démonstration du filtrage de surface à partir de certains profils de données réelles d'un balayage de fond marin et d'une estimation des conditions de bruit	106
Figure 39 : Léger tangage provoquant la rotation d'un profil sonar et données superposées dans l'axe transversal	114
Figure 40 : Projection des distances chaque coté d'une discontinuité 0	116
Figure 41 : Exemple de reconstruction par la méthode de Hoppe	120
Figure 42 : Éléments de géométrie acceptables d'une projection cylindrique	121
Figure 43 : Démonstration 2D du concept de l'algorithme Crust : graphes de Voronoï, de Delaunay et final	123
Figure 44 : Plan de vérification de superposition locale	128
Figure 45 : Représentation « en fil de fer » de la connectivité par continuité temporelle	134
Figure 46 : Maillage d'une cellule entre deux scans consécutifs	134
Figure 47 : Compensation du décalage transversal dans le maillage des triangles	135
Figure 48 : Graphiques de distance inter-scan pour la sélection de l'indice de décalage	136
Figure 49 : Segmentation en zones de chevauchement local	137
Figure 50 : Continuité correcte par projection 2D locale	137
Figure 51 : Disposition des algorithmes dans les logiciels TdB et E3D	141
Figure 52 : Processus algorithmique de la connectivité simple	143
Figure 53 : Processus algorithmique de la connectivité par projection 2D	144
Figure 54 : Processus algorithmique complet de la connectivité par projection 2D ...	145
Figure 55 : Exemple de reconstruction idéale par la méthode de connectivité simple	149
Figure 56 : Vue à courte distance de l'entrée d'eau du milieu et des débris accumulés	150
Figure 57 : Vue générale de la surface reconstruite seule	151
Figure 58 : Vue opaque à courte distance de la surface reconstruite seule	151
Figure 59 : Vue opaque de la surface reconstruite seule	152
Figure 60 : Vue opaque à courte distance de la surface reconstruite seule	153
Figure 61 : Vue à courte distance et opaque de la surface avec présentation de ses segments de triangle	153

Figure 62 : Reconstruction avec bruit impulsionnel et de surface mais sans filtrage ..	154
Figure 63 : Vue générale d'une surface reconstruite avec filtrage impulsionnel	155
Figure 64 : Trous laissés dans la surface par la transparence des triangles classés comme discontinuités	156
Figure 65 : Vue à courte distance de la surface avec filtrage impulsionnel	156
Figure 66 : Variation du facteur de bruit de surface lors de la simulation	157
Figure 67 : Résultat avec filtrages impulsionnel et de surface	157
Figure 68 : Premier balayage du fond du bassin de St-Bruno	158
Figure 69 : Premier balayage du fond du bassin de St-Bruno avec connectivité par projection 2D	159
Figure 70 : Deuxième balayage du bassin de St-Bruno par connectivité simple	160
Figure 71 : Deuxième balayage reconstruit avec connectivité par projection 2D	160
Figure 72 : Troisième balayage du fond du bassin de St-Bruno	161
Figure 73 : Quatrième balayage du fond du bassin de St-Bruno	161
Figure 74 : Cinquième balayage du fond du bassin de St-Bruno	162
Figure 75 : Représentation virtuelle de référence du quai Bickerdike	163
Figure 76 : Premier balayage du quai Bickerdike	163
Figure 77 : Deuxième balayage du quai Bickerdike	164
Figure 78 : Troisième balayage du quai Bickerdike	164
Figure 79 : Quatrième balayage du quai Bickerdike	165
Figure 80 : Cinquième balayage du quai Bickerdike	165
Figure 81 : Superposition visuelle de plusieurs surfaces reconstruites du quai Bickerdike	166
Figure 82 : distance de mesure réelle lors d'une vitesse non-négligeable du sonar	175

LISTE DES GRAPHIQUES

	Page
Graphique 1 : Courbe temporelle d'amplitudes et seuils de détection	20
Graphique 2 : Courbes de température, salinité, pression et vitesse de propagation dans la baie de Monterey (sept. 1990)	28
Graphique 3 : Courbe de vitesses linéarisée des mesures de Monterey et gradient vertical	32
Graphique 4 : Trajectoires rectiligne et déviées en distance parcourue selon une certaine courbe de vitesses	32
Graphique 5 : Trajectoires fortement déviées par un gradient de vitesses accentué ...	33
Graphique 6 : Exemple d'un scan réel du fond d'un étang en représentation « faux polaire »	57
Graphique 7 : Différence entre le bruit impulsionnel et une discontinuité positive de profondeur	63
Graphique 8 : Comparaison des résultats de filtrage par les médians classique et « tronqué », avec un voisinage de tailles 3 et 5	64
Graphique 9 : Remplissage par interpolation linéaire d'un profil contenant des « données 0 »	66
Graphique 10 : Coéfficients des matrices de convolution gaussiennes pour divers écart-types	70
Graphique 11 : Gradient du profil et adaptation de la variance pour différents facteurs K	71
Graphique 12 : Résultats de filtrage à l'aide de deux facteurs K particuliers	72
Graphique 13 : Lissage de profil par filtre Wiener de taille 3 et différentes largeur de bordures ajoutées	74
Graphique 14 : Correction d'un profil par filtre Wiener à l'aide de différentes largeurs de voisinage	75
Graphique 15 : Filtrage gaussien adaptatif avec K=10 et segmentation préalable	86
Graphique 16 : Évolution de l'erreur par filtrage gaussien adaptatif et paramètre K ..	87

Graphique 17 : Évolution de l'erreur par filtrage weiner et paramètre de taille de voisinage	88
Graphique 18 : Comparaison des différents filtres étudiés	90

LISTE DES PHOTOS

	Page
Photo 1 : Le sous-marin ROVIII	1
Photo 2 : Photos de la roulotte de transport, d'une mise à l'eau, du tableau de bord et de l'écran de commande en particulier	2
Photo 3 : Images vidéo de surfaces d'un barrage lors d'une inspection	3
Photo 4 : Composants matériels du sonar : tête du récepteur, tête émettrice auxiliaire et ordinateur de calcul	18
Photo 5 : Vélocimètre DIGIBAR-PRO de la compagnie Odom Hydrographic Systems	34
Photo 6 : Équipement du système AquaMap	46
Photo 7 : Photo du quai Bickerdike du port de Montréal	162

LISTE DES ABRÉVIATIONS

IREQ	Institut de recherche d'Hydro-Québec
ETS	École de technologie supérieure
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
ITS-90	International Temperature Standard, établie en 1990
CRSNG	Conseil de recherche en science naturelle et en génie du Canada
ESII-2	Bourse « Études supérieures à incidence industrielle, type 2 »
MICROB	Modules intégrés pour le contrôle de robots
E3D	logiciel Environnement 3D
TdB	logiciel Tableau de Bord
1D	Une dimension ou unidimensionnel
2D	Deux dimensions ou bidimensionnel
3D	Trois dimensions ou tridimensionnel
m	mètre
m/s	mètre par seconde
cm	centimètre
sec	seconde
rad	radian
rad/s	radian par seconde
EDP	Équation différentielle partielle
MSE	Erreur carré moyenne « Mean squared error »

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les réserves hydrologiques de la province du Québec sont énormes et nous avons su en tirer profit en érigeant bon nombre de barrages hydroélectriques le long des cours d'eau présentant un dénivelé ou un débit important. Il ne faut pas oublier cependant que ces ouvrages de génie civil exigent beaucoup d'entretien pour en assurer la pérennité et en maximiser le rendement, sans négliger la sécurité des populations avoisinantes. Malheureusement, cet entretien est complexe et très coûteux. L'inspection de la partie en amont du barrage doit se faire sous l'eau et en présence de forts courants, ou à sec à l'aide d'énormes caissons étanches appelés batardeaux. C'est pourquoi l'IREQ a, au cours des années, mis au point différents capteurs d'inspection et outils de réfection de nature électro-mécanique, afin de simplifier, sécuriser et possiblement automatiser ce travail souvent effectué par des plongeurs dont la dextérité est limitée par des gants.

Un des derniers équipements développés, et un des plus polyvalents, est un mini sous-marin d'inspection (voir photo 1) dit « à cadre ouvert ». Conçu pour se mouvoir selon quatre degrés de libertés (trois translations et une rotation autour de l'axe vertical), il reste stable en tangage et roulis grâce à sept propulseurs croisés.

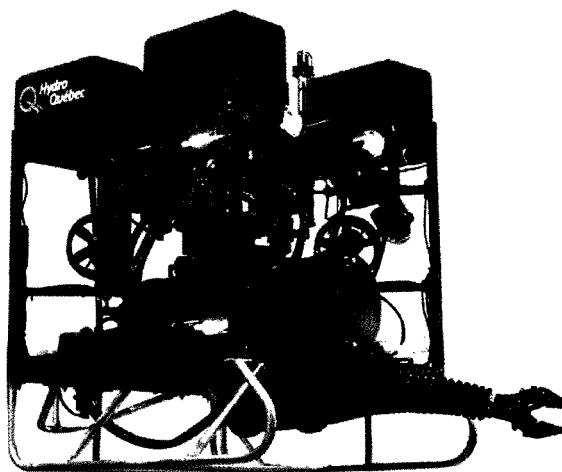


Photo 1 : Le sous-marin ROVIII

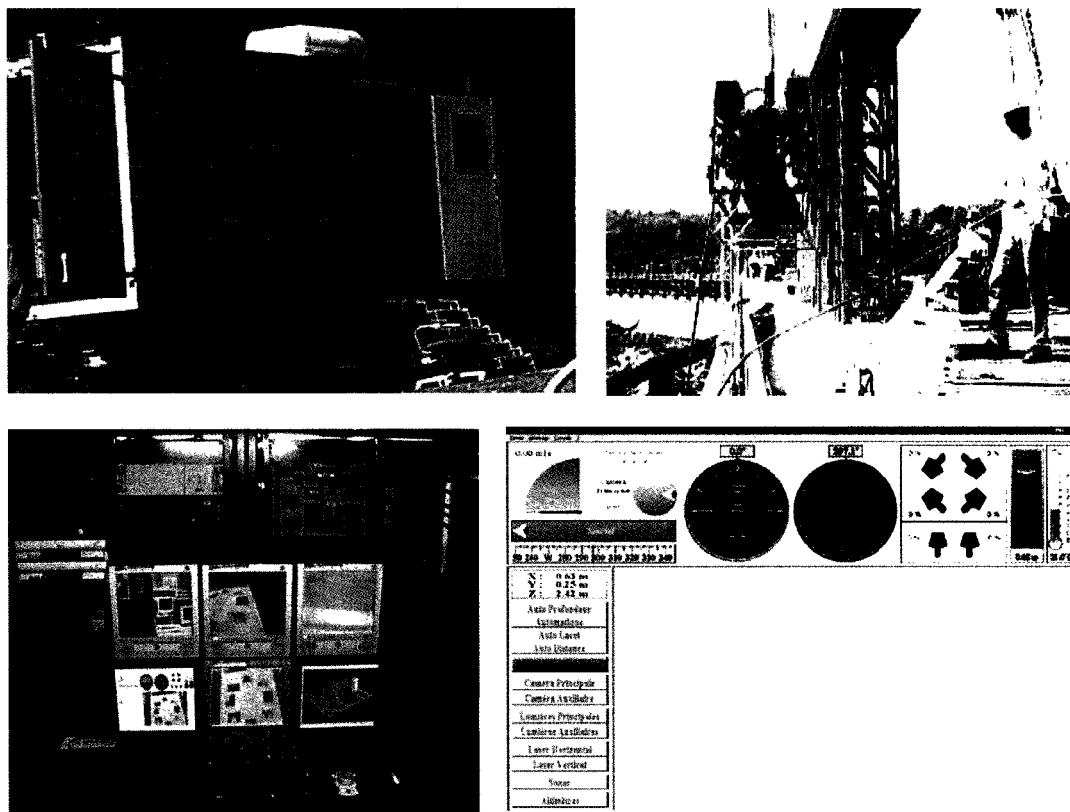


Photo 2 : Photos de la roulotte de transport, d'une mise à l'eau, du tableau de bord et de l'écran de commande en particulier

Durant sa plongée, le sous-marin est relié par un long ombilic sur dévidoir à une roulotte de contrôle (voir photo 2) à partir de laquelle il est télé-opéré par le plongeur resté en surface. Il est également équipé d'une caméra avec réticule laser, pour faire des inspections rapprochées et des mesures dimensionnées des imperfections des surfaces du barrages (voir photo 3), de même que d'un sonar qui permet au pilote de détecter la présence d'objets et d'obstacles.

Malheureusement, comme on peut le remarquer sur ces images, la caméra est troublée par la turbidité (quantité de particules en suspension) et n'est vraiment utile qu'à courte distance : généralement moins d'un mètre. Même un éclairage d'appoint puissant est inutile, parce que la lumière se trouve interceptée par les particules et crée un halo éblouissant à l'image.

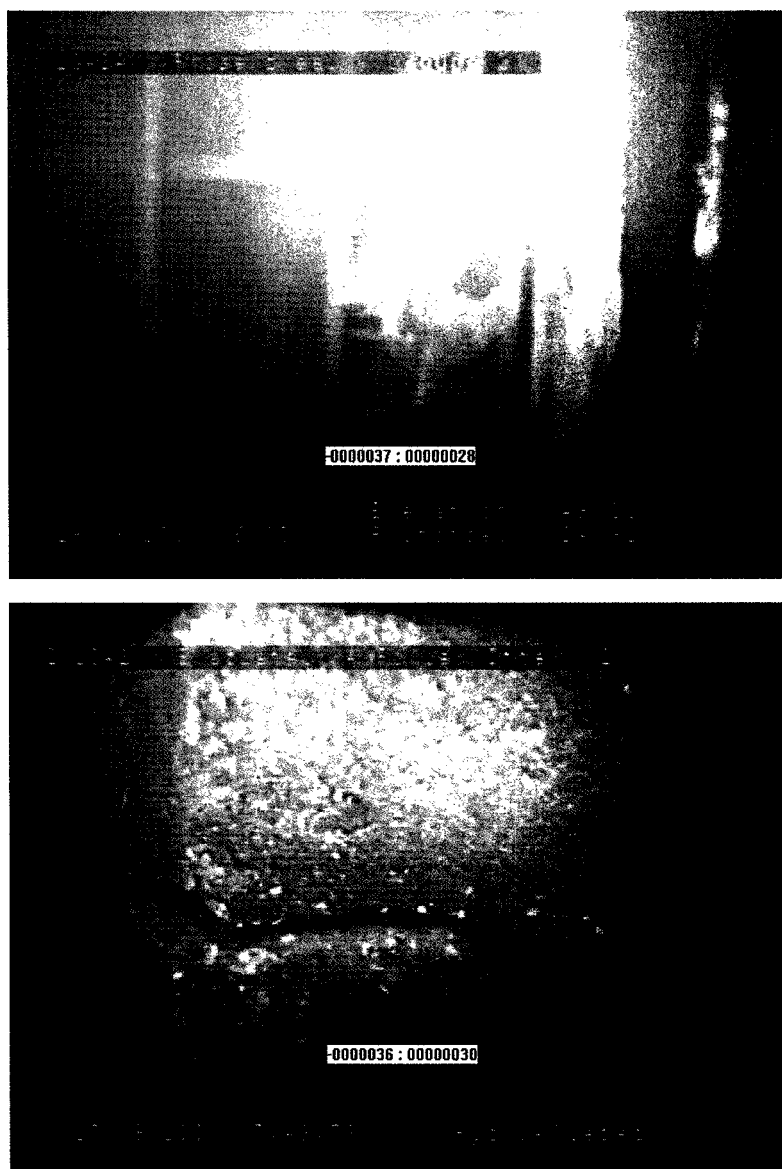


Photo 3 : Images vidéo de surfaces d'un barrage lors d'une inspection

En considérant qu'un barrage peut avoir une hauteur allant de quelques mètres à plus de deux cents mètres (barrage Daniel-Johnson « Manic-5 »), et qu'il est généralement encore beaucoup plus large, une visibilité de seulement une centaine de centimètres est bien peu et, à moins de suivre la parois de près, le pilote ne voit, la majorité du temps, que du noir à l'écran.

Pour pallier à cette importante contrainte de navigation, un système de positionnement 3D a été installé sur le véhicule afin de connaître en tout temps ses déplacements et son orientation. L'information ainsi obtenue permet de synchroniser la position du sous-marin dans un environnement virtuel simultané (voir figure 1) suffisamment fidèle au site inspecté pour que le pilote puisse suivre ses déplacements de façon claire.



Figure 1 : Affichage virtuel d'une surface de barrage avec son sous-marin synchronisé en position

Cette représentation 3D servant de « caméra virtuelle » dans un monde sans limitation visuelle est une importante innovation dans le domaine des véhicules sous-marin télé-opérés et pourrait également servir à la planification de trajectoires et de tâches.

Il ne faut pas oublier, par contre, que pour offrir les pleines capacités de ce guide à la navigation, il est essentiel d'avoir à sa disposition les plans du site afin d'en créer une réplique la plus fidèle possible dans ses dimensions, mais simplifiée en quantité de détails. Malheureusement, nous ne possédons pas, à l'heure actuelle, tous ces plans d'ingénierie civile dans un

format utilisable, ou complet. Il nous faut donc être capable de nous en passer et de pouvoir reconstruire ces plans sur place, durant les inspections, même de façon grossière.

La motivation première de ce projet de recherche est donc de pouvoir remodeler, « reconstruire en virtuel » (voir figure 2¹), les formes actuelles des parties submergées des barrages à l'aide du sonar pour que cette information puisse être utilisées comme aide à la navigation du véhicule. De plus, si la qualité des mesures et du système dans son ensemble le permettent, ces données pourraient servir à l'établissement de comparatifs entre l'état actuel des lieux et les géométries des plans originaux : mouvement de vase, amoncellement de débris, déformation et érosion des structures, etc.

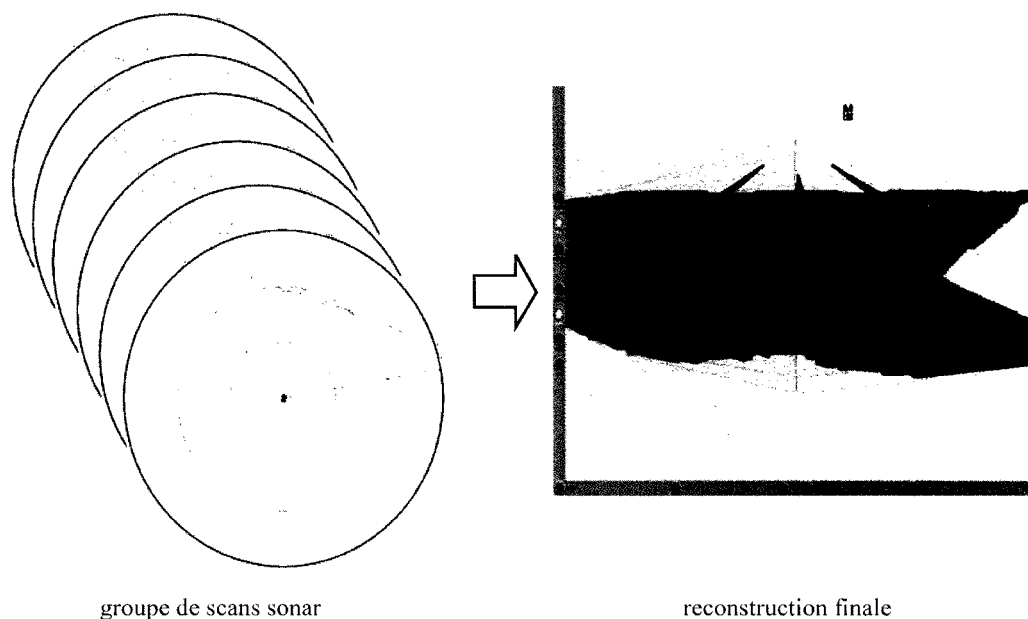


Figure 2 : Représentation de la problématique de ce projet : reconstruction de surfaces à partir de profils de points 3D accumulés par balayage

¹ Bien que les profils sonar apparaissent sur fond noir à l'écran du poste de commande, pour les besoins de ce document ils seront modifiés afin d'apparaître sur fond blanc.

Pour en arriver à ce résultat final, le processus de reconstruction fait appel à plusieurs étapes de traitement de signaux 1D, de projections 2D/3D, de critères géométriques, de mises en graphes 2D/3D, etc. Ce mémoire présente donc la modélisation et le développement de quatre aspects importants du processus de reconstruction 3D :

- a. la prise de mesures référencées;
- b. le filtrage des données brutes;
- c. la structuration de ces profils de points en une représentation 3D virtuelle;
- d. l'unification de segments de géométrie afin d'obtenir un environnement plus complet à partir de multiples balayages.

Problématique

Le problème se pose ainsi : trouver une solution fonctionnelle permettant l'accumulation de données sonar, la reconstruction des géométries résultantes du « nuage de points » et l'affichage des surfaces obtenues dans l'environnement virtuel 3D du poste de commande.

La méthode de reconstruction doit être valable pour différentes trajectoires de prise de mesures discontinues et non-rectilignes. Ce travail touche les problématiques associées à la précision des mesures sonar référencées, à l'amélioration des données brutes par filtrage, au processus de reconstruction des informations géométriques et à celui de l'unification des surfaces.

Objectifs globaux

- a. Créer un module logiciel capable, à partir de données sonar référencées, de construire une surface complexe et de l'afficher dans un environnement 3D existant;

- b. Mettre en place un simulateur sonar d'aspect suffisamment réaliste travaillant sous les contraintes temps réel et utilisant un minimum de ressources du poste d'entraînement.

Objectifs spécifiques

a. Prise de mesures sonar référencées (Partie 1) :

1. déterminer un niveau de confiance des mesures en tentant de prévoir le comportement de la propagation acoustique dans les environs immédiats;
2. estimer la perte de précision des mesures introduite par le référencement;
3. étudier différentes techniques de filtrage afin d'améliorer la qualité des données brutes;
4. développer une simulation sonar pour le poste d'entraînement.

b. Reconstruction 3D de géométries et unification de surfaces (Partie 2) :

1. étudier différentes méthodes de maillage des points 3D capables de prendre en compte des données montrant des recouvrements et absences locales de données;
2. représenter les modèles obtenus dans un format aisément et efficacement affichable pour le pilote durant l'inspection;
3. représenter graphiquement à l'utilisateur les endroits où la géométrie des surfaces est inadéquate (trou, faible densité de triangles, etc).
4. étudier différentes méthodes d'unification de surfaces capables de prendre en compte des variations de précision des mesures afin de privilégier l'information la plus juste.

Contraintes

- a. Bien que cette version du processus de reconstruction ait été conçue comme une fonctionnalité hors-ligne (i.e. désactivée durant l'accumulation de profils sonar), la solution ne devrait pas demander trop de ressources pour ne pas incommoder le pilote du sous-marin durant son utilisation, afin qu'il puisse profiter des nouvelles informations d'obstacles au cours de la plongée;
- b. Une mesure sonar est constituée d'une courbe temporelle d'amplitude de réception du signal réfléchi (voir chapitre 1.2). Par contre, de par la configuration actuelle du sonar, seule les informations de détection d'échos importants (temps de trajet) nous sont disponibles.

Hypothèses de départ

- a. La position et l'orientation du sonar sur le cadre du sous-marin sont connues;
- b. L'environnement est statique : il n'y a aucun mouvement d'objet autre que le sous-marin lui-même;
- c. La position et l'orientation du sous-marin dans l'espace sont connues en tout temps et la précision de ces informations est considérée stable et maximale;
- d. Durant l'accumulation des données par balayage, les positions d'émission et de réception de l'écho sont considérées identiques. En particulier la rotation de la position, car elle a une plus grande influence que la translation;
- e. Le délais entre l'obtention des informations d'un scan et l'obtention de la position actuelle du sous-marin est considéré négligeable;

- f. Puisqu'il n'est pas encore possible de les mesurer avec l'équipement actuellement disponible, les caractéristiques acoustiques de l'environnement immédiat du sous-marin (température, salinité et vitesse du son) sont considérées statiques et estimées à priori par une courbe de vitesses.

Méthodologie et approches préconisées

Chacune des deux parties (voir figure 3) étant de natures très différentes, elles nécessitent des approches et des solutions technologiques particulières.

- a. Prise de mesures sonar référencées (Partie 1) :

- 1. Estimer la précision des mesures effectuées selon les conditions acoustiques et la position du sous-marin donnée par le système de positionnement.

- b. Reconstruction 3D de géométries et unification de surfaces (Partie 2) :

- 1. Étudier différentes méthodes de maillage des points 3D capables de prendre en compte des données montrant des recouvrements et absences locales de données;
 - 2. Étudier différentes méthodes d'unification de surfaces capables de prendre en compte des variations de mesures de confiance afin de privilégier l'information la plus juste.

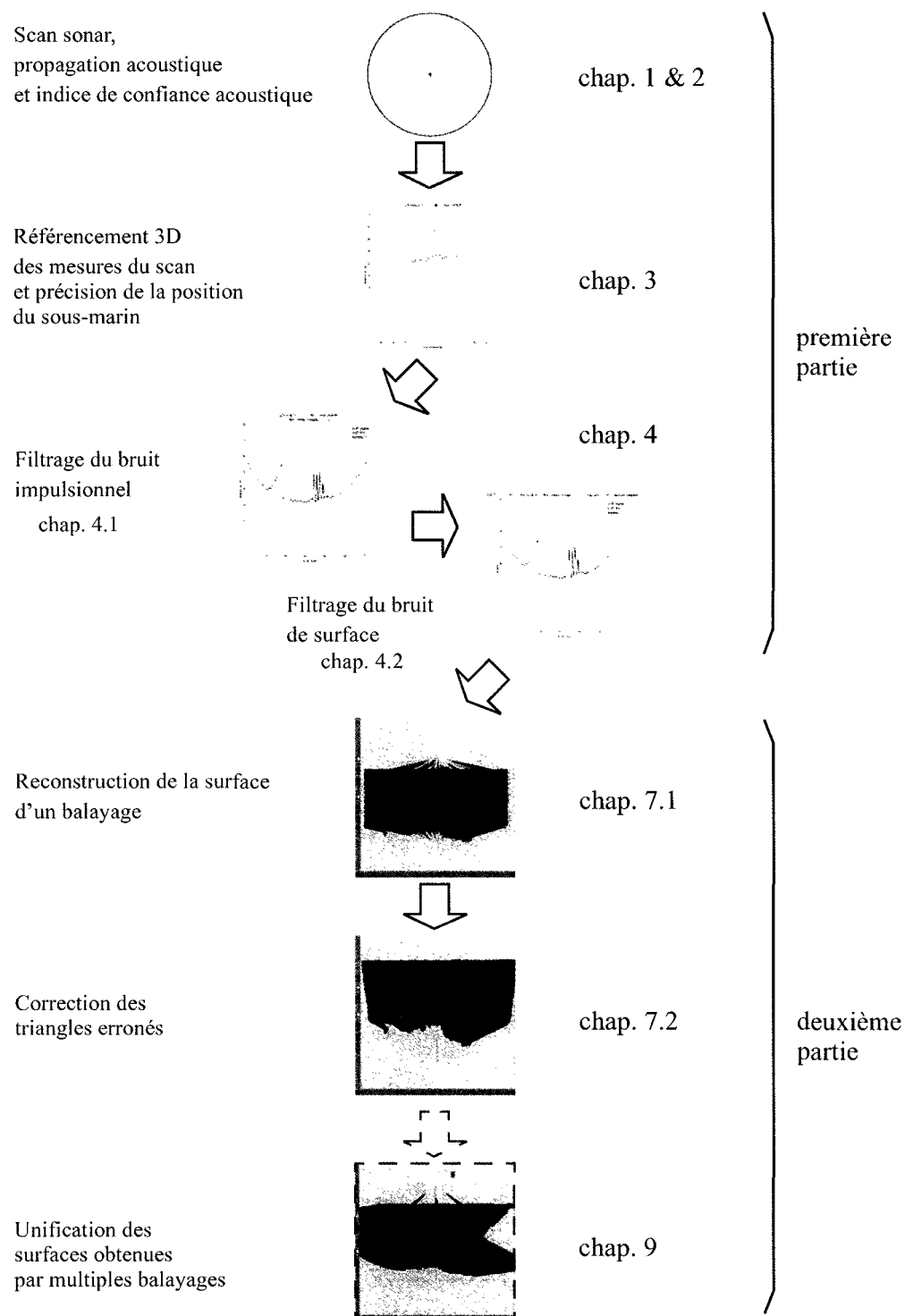


Figure 3 : Représentation du procédé complet

En tout premier lieu, afin de répondre à un besoin de validation/entraînement par les usagers/plongeurs, et vu de fortes contraintes matérielles (pas de bassin de test assez grand et peu de visites sur le terrain organisables), une station de simulation a été conçue dès les prémices du projet global, de façon à reproduire fidèlement le poste de commande du sous-marin. Il inclut une simulation du comportement du sonar (voir chapitre 5.1), et une version préliminaire du logiciel Environnement 3D (E3D) permettant d'installer une méthode simple de reconstruction (voir chapitre 7.1.4). Cette station de travail a surtout permis de mettre en place toute la mécanique de transfert, de conversion et de sauvegarde en fichier des données, sans parler de la partie d'interface usager de E3D nécessaire à la mise en route de la reconstruction 3D.

Ensuite, l'amélioration et l'ajout des fonctionnalités manquantes est planifiée selon l'ordre suivant :

- a. Élaboration, à l'aide du logiciel Matlab, d'un algorithme de calcul de diffraction acoustique basé sur la méthode RRA, afin de vérifier les distances à parcourir pour une diffraction significative des « rayons sonar » et confirmer que la linéarisation des parcours d'ondes est une approximation suffisante aux distances qui nous préoccupent.
- b. Réduction des contraintes de la méthode initiale de maillage simple de surfaces et vérification des limites d'utilisation dans le cadre du projet afin de déterminer le besoin d'une méthode encore plus générale.
- c. Validation pratique des bruits utilisés dans la simulation par comparaison qualitative avec des séances de prise de mesures réelles et mise en place de méthodes de filtrage.
- d. Mise en place de la méthode implicite d'unification de surfaces.

Structure particulière du document

Comme on peut le voir, ce travail de recherche se compose de quatre aspects très différents, mais complémentaires, que l'on peut regrouper en deux thèmes : l'utilisation du sonar référencé et la reconstruction de surfaces. Ce mémoire est donc divisé en deux parties distinctes afin de permettre une meilleure compréhension de chaque étape, tout en forgeant une vision globale du projet (voir figures 3 et 4).

La première partie présente la prise de mesures sonar. Les chapitres 1 à 5 offrent une récapitulation théorique de la propagation acoustique en milieu aquatique et leur simulation numériques, une description complète de la chaîne des référentiels 3D impliqués et les différentes techniques de filtrage des données brutes. La deuxième partie, couverte par les chapitres 6 à 9, démontre le processus de reconstruction 3D, discute du principe d'unification des surfaces et propose des exemples de reconstructions complètes à partir du simulateur sonar et de données prises sur le terrain.

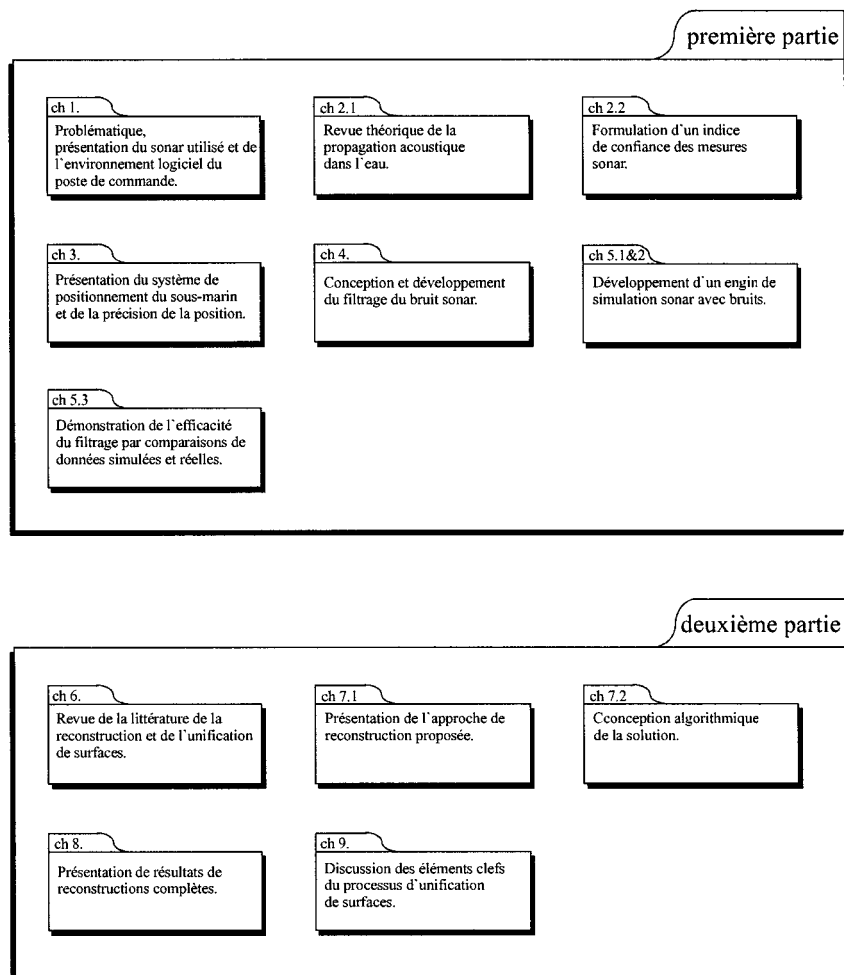


Figure 4 : Présentation des sections du document

PREMIÈRE PARTIE

MESURES ACOUSTIQUES RÉFÉRENCÉES

INTRODUCTION

L'une des premières tâches accomplies par les plongeurs lors de l'inspection d'un site est de repérer et cataloguer des indices d'éventuelles faiblesses et cavités dans les parois du barrage. Ces défauts, habituellement dus à l'érosion d'une petite fissure par un courant d'eau, peuvent devenir extrêmement dangereux pour la sécurité des plongeurs et l'intégrité du barrage. Jusqu'à la création d'un sous-marin d'inspection, la principale méthode de suivi de ces défauts consistait à les prendre en photo et à mesurer, à la main, leurs dimensions grossières. Une première version du ROV a été munie d'une caméra et d'un faisceau laser projetant une ligne sur la surface du barrage. Cela permettait de se faire une idée des dimensions en mesurant un motif de taille connue. Malheureusement, comme il était difficile de diriger le véhicule au bon endroit, la caméra avait une trop faible portée pour être vraiment utile. La version actuelle du sous-marin d'inspection ROV a été conçue avec un système de localisation et un sonar embarqué pour aider au pilotage et à la navigation. Grâce à ces deux nouveaux équipements il est maintenant possible de reconstruire la géométrie des lieux dans lequel évolue le sous-marin afin de faciliter le repérage des endroits où le pilote veut se rendre.

On trouve actuellement deux médiums de mesures capables d'opérer sous l'eau : la lumière et le son. Le premier, discuté plus haut, consiste généralement à projeter sur la cible un faisceau présentant un motif connu et à calculer le « facteur d'échelle visuelle » de celui-ci dans une photo. Cela revient à calculer la distance d'éloignement de la cible. Malheureusement, la prise d'images sous l'eau ne pouvant se faire qu'à très courte portée, généralement moins d'un mètre, cette méthode ne reste praticable que pour des mesures ponctuelles. Le deuxième médium, le sonar, fait appel à une « durée de trajet » de la propagation acoustique aller-retour entre l'émetteur et un écho de la cible. C'est pourquoi il a été choisi comme instrument de mesure pour ce projet. Cependant, l'acquisition des mesures de distance seule n'est pas suffisante. Ces mesures sont prises de manière relative au véhicule et il est néces-

saire de pouvoir leur attribuer une position par rapport à un référentiel global au site. Pour ce faire, le sous-marin est équipé d'un système autonome de localisation donnant sa position dans le bassin par rapport à trois balises en surface.

Un autre aspect d'importance est notre « niveau de confiance » dans les données récoltées. La propagation acoustique dans l'eau est un phénomène hautement non-linéaire, voire même chaotique à petite échelle, variant en tous points et dans le temps. Heureusement, il est quand même possible d'en prévoir le comportement à l'échelle qui nous concerne. Il est même possible d'appliquer des techniques relativement simples de filtrage afin de réduire l'importance de phénomènes locaux indésirables.

La première partie de ce mémoire comprend cinq chapitres. Elle présente les caractéristiques du sonar utilisé, ainsi que des architectures matérielle et logicielle du sous-marin et de son poste de contrôle. Puis, une brève revue de littérature propose une révision sommaire de la théorie de la propagation du son dans l'eau et son utilisation par le sonar. Le troisième chapitre expose les différents référentiels impliqués lors de l'attribution d'une « position globale » à chaque mesure et définit les imprécisions impliquées. Ensuite, nous verrons les différentes techniques de filtrage utilisables. Enfin, l'élaboration d'une simulation numérique du fonctionnement du sonar pour le poste d'entraînement et une comparaison entre des données simulées et des résultats préliminaires de mesures prises sur le terrain sont présentées.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE ET ÉQUIPEMENT SONAR

Avant de plonger dans les profondeurs techniques de ce projet, il serait important d'avoir une bonne vue d'ensemble de l'environnement technologique et logiciel dans lequel évolue la fonctionnalité de reconstruction de surfaces, le sujet de ce mémoire. Après une récapitulation de la problématique de cette partie, nous allons passer en revue les caractéristiques de l'équipement utilisé, la segmentation en unités logicielles des processus de la station de commande du sous-marin, de même que les flots d'informations les inter-reliants et menant à une reconstruction de l'environnement immédiat du véhicule.

1.1 Problématique

Comme dans tout processus scientifique rigoureux, la qualité du résultat final dépend en grande partie de la qualité des données à l'entrée. Nous verrons plus loin qu'il est possible d'améliorer cette qualité à l'aide de différents filtres, mais une connaissance suffisante des phénomènes acoustiques qui engendrent ces bruits est importante afin de pouvoir confirmer la pertinence de ces filtres.

Et quelle est la justesse de ces mesures? Nous allons voir que leur précision dépend à la fois de la qualité des mesures sonar et de notre bonne connaissance de la position du véhicule dans l'eau. En ce qui concerne les données sonar il est très difficile de connaître toutes les informations nécessaires afin de pouvoir modéliser correctement le comportement en propagation de l'onde sonore dans un certain volume d'eau, c'est pourquoi nous allons plutôt élaborer un «indice de confiance» heuristique estimant ce comportement. La position, quant à elle, ne peut être connue très précisément non plus, mais une bonne estimation peut être obtenue. Il ne restera plus qu'à combiner ces deux facteurs pour obtenir une valeur significative et utile pour la deuxième partie du projet et de ce document.

1.2 Sonar SM 2000 ECHO SOUNDER

Les méthodes élaborées dans ce projet ne sont pas limitées à l'utilisation d'un modèle spécifique de sonar, ses caractéristiques de fonctionnement étant disponibles à travers un fichier de configuration, mais puisqu'un seul équipement a été employé au cours de ces travaux, il servira d'exemple pour l'explication des caractéristiques typiques.



Photo 4 : Composants matériels du sonar : tête du récepteur, tête émettrice auxiliaire et ordinateur de calcul

Le sonar SM2000 (voir photo 4²) de la compagnie Kongsberg Simrad Messtech [1] contient 80 capteurs ultrasoniques disposés en arc de cercle de 120° et possédant chacun un cône de réception de 20°. Grâce à ces informations brutes et au procédé mathématique de formation de rayons (« beam forming »), le sonar peut fournir 128 courbes d'amplitudes temporelles individuelles couvrant chacune un secteur de réception indépendant de 20° x 0,94°. Également, grâce à un émetteur auxiliaire (mode « echo sounder »), les secteurs de réception peuvent être réduits à 1,5° x 0,94° (voir figure 5), afin de permettre une meilleure discrimination des obstacles rencontrés.

² Pour les besoins d'illustration du présent document, cette figure a été tirée de la brochure SM 2000 Echo Sounder Product Specifications.

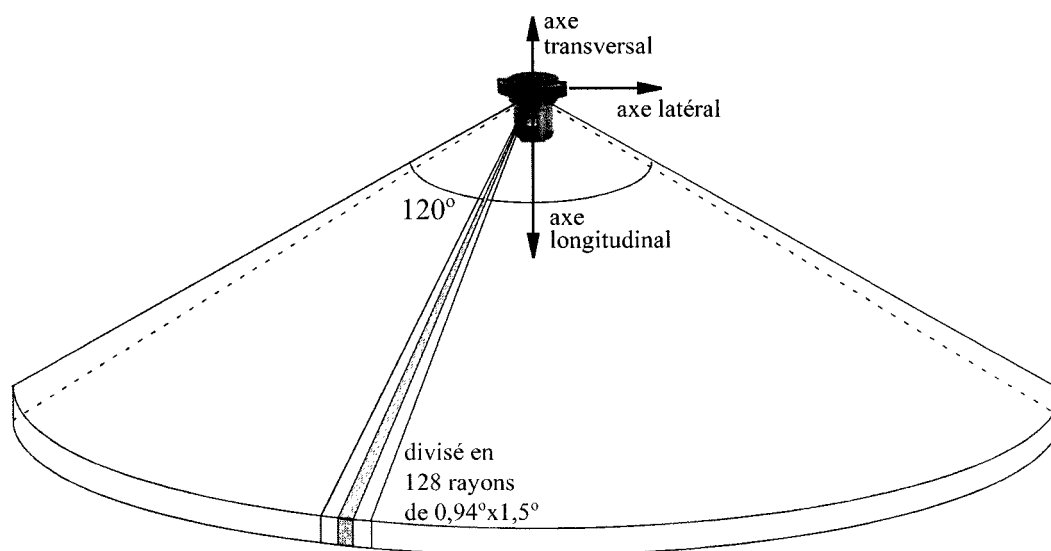


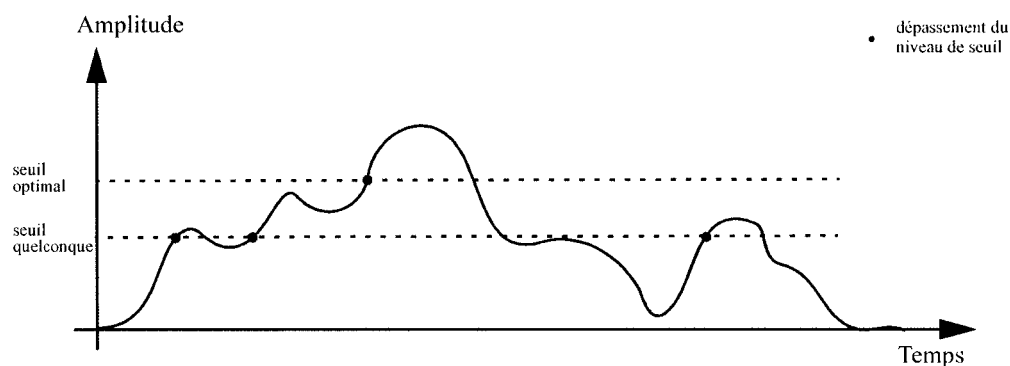
Figure 5 : Géométrie des rayons du sonar et axes de son référentiel polaire

Ce n'est pas, par contre, toute l'information des courbes d'amplitudes qui est disponible au poste de commande. En effet, l'ordinateur du sonar ne peut offrir ses données à l'extérieur que par port série et, afin de ne pas surcharger la capacité de transmission, il effectue d'abord le seuillage des amplitudes (voir graphique 1). Cela lui permet de fournir, au maximum, les quatre premières valeurs dépassant le seuil fixé par l'utilisateur au préalable. Il est important de réaliser que le choix d'un petit nombre de retours pour chaque rayon minimise les chances d'obtenir parmi ceux-ci le maximum global du signal. Pourtant, celui-ci serait intéressant, car il correspondrait probablement à la distance de la surface réelle.

Quoi qu'il en soit, le sonar SM2000 retourne, pour chaque prise de mesures, 128 (x 1-4) informations de distance qui peuvent être interprétées comme un profil horizontal (ou «scan» dans le reste de ce document) de l'espace en avant de l'appareil.

Par contre, il est possible que le seuil choisi soit plus élevé que l'amplitude maximale de la courbe. Dans ce cas, plutôt que de réduire le nombre d'informations contenues dans un profil, une donnée de valeur 0 est insérée. Vous pouvez voir à la figure 6 un rendu d'écran de

l'ordinateur sonar : une reconstitution cartésienne des amplitudes complètes, et à la figure 7 la relation spatiale des informations de seuils.



Graphique 1 : Courbe temporelle d'amplitudes et seuils de détection

Ce paramètre du nombre d'échos retournés demande l'élaboration d'une stratégie de collecte de données qui tente de concilier ces deux extrêmes :

- a. Nombre de retours minimum par rayon (1) : On peut considérer cet extrême en supposant que le seuil choisi est suffisamment élevé pour que seul l'écho de la surface réelle (maximum) soit fourni, mais pas trop pour ne rien capter du tout. On pourrait considérer cette méthode comme une manière détournée de récupérer le maximum des ondes d'amplitudes. Malheureusement, dans la pratique, ce seuil idéal est très difficile à définir, il n'est pas le même en toutes circonstances et une mauvaise valeur signifie souvent que les distances retournées correspondent à un «bruit» de plus courte distance qui entraînera un plus grand nombre de données manquantes.
- b. Nombre de retours maximum par rayon (4) : Cette fois-ci, on ne veut rien manquer en plaçant le seuil moins élevé. Beaucoup plus de bruit sera présent et l'étape du filtrage sera complexe. On pourrait croire que cette autre extrême est préférable à la première (en supposant un filtrage performant), mais puisque nous n'avons pas accès à l'information

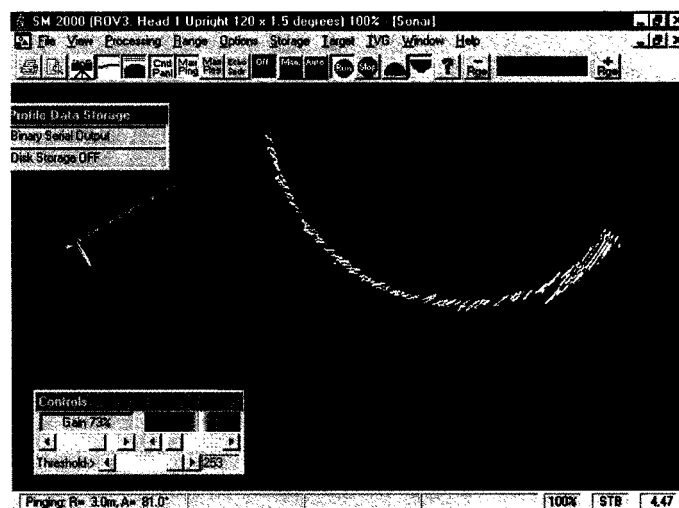
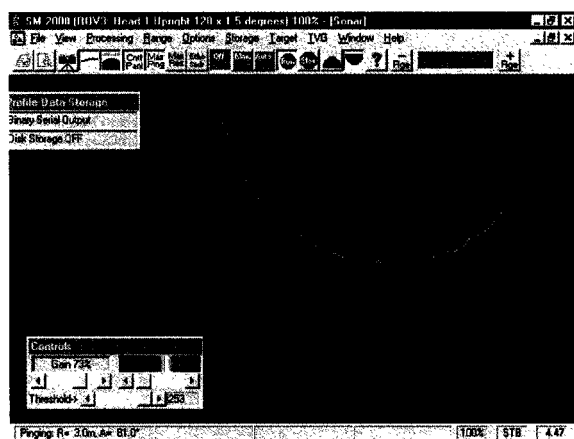


Figure 6 : Reconstitution cartésienne des amplitudes sonar



1 valeur
retournée
par rayon

4 valeurs
retournées
par rayon

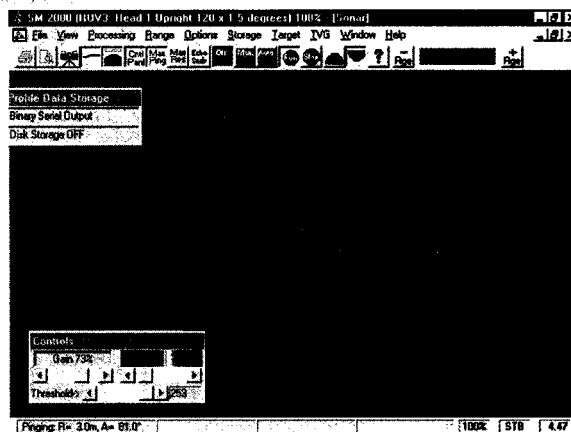


Figure 7 : Reconstitution cartésienne des positions de seuils retournées

de maximum global et que de nombreux échos de bruit sont acceptés, rien ne dit que la surface réelle fait partie des quatre premiers échos retournés. Cela compliquera énormément la sélection des distances pertinentes et créera probablement autant de manques dans les profils.

1.3 Architecture logicielle de la station de commande et flots d'information

Voici une vue d'ensemble (figure 8) des composantes logicielles de la station de commande installée dans la roulotte, et des informations voyageant entre celles-ci : les amplitudes temporelles des capteurs sont acheminées à travers l'ombilic directement à l'ordinateur du sonar où elles sont converties en courbes d'amplitudes des 128 rayons et seuillées pour obtenir les 1-4 maximums locaux qui seront transmis par lien série à l'ordinateur du poste de commande. Un premier module Tableau de Bord (TdB) effectue le référencement des mesures et transmet ces profils 3D au logiciel E3D (hôte du module de reconstruction).

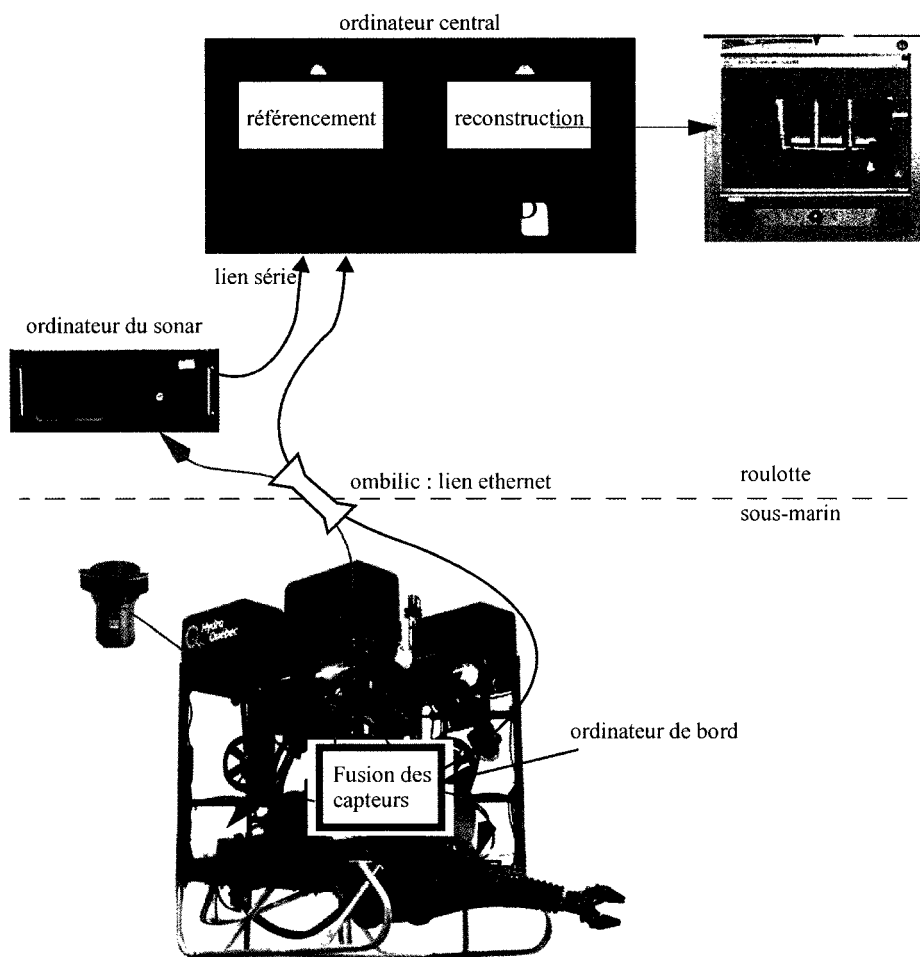


Figure 8 : Composantes logicielles et flots d'information

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE ET SOMMAIRE THÉORIQUE

L'utilisation du sonar semble, à priori, assez aisée : un groupe de 128 mesures est obtenu, donnant le profil des objets et obstacles à proximité. Mais à quel point peut-on faire confiance à ces mesures? Peut-on vraiment assumer une vitesse de propagation, et donc un temps de transport, uniforme et une trajectoire rectiligne comme pour un laser? Il est important de répondre, au moins sommairement, à ces questions, afin de bien comprendre les limitations intrinsèques des mesures de distances par sonar et de proposer une méthode d'estimation d'un « indice de confiance » en celles-ci qui sera utile lors de l'unification des surfaces.

Puisqu'une connaissance approfondie de la théorie de la propagation acoustique dans l'eau est superflue dans le cadre de ce mémoire, nous allons simplement réviser certaines des notions les plus utiles dans le contexte qui nous préoccupe. Nous allons d'ailleurs laisser à des chapitres ultérieurs les aspects du filtrage et de la simulation numérique du sonar.

La recherche bibliographique de ce chapitre fait appel à certains ouvrages incontournables du domaine, tels que Urick [2], Etter [3], Etter [4] et Etter [5], mais également aux bases de données Compendex et IEEExplore pour des articles utiles. L'emploi de mots clefs judicieux a permis d'obtenir une vaste liste de documents potentiels dont il fallait déterminer la pertinence. Ensuite, à partir des documents jugés valables, une vérification des autres documents publiés par ces même auteurs a permis de s'assurer de ne rien manquer.

2.1 Principe de fonctionnement du sonar

Après avoir présenté au chapitre précédent les fonctionnalités générales du sonar et avant de s'attarder aux spécificités de celui-ci qui nous importent, il serait bon de rappeler les élé-

ments théoriques sur lesquels les capacités du sonar reposent. Selon Etter [5], nous pouvons regrouper en quatre catégories les phénomènes acoustiques sous-marin : environnementaux, propagation, bruit et réverbération. La figure 9 montre leur importance relative.

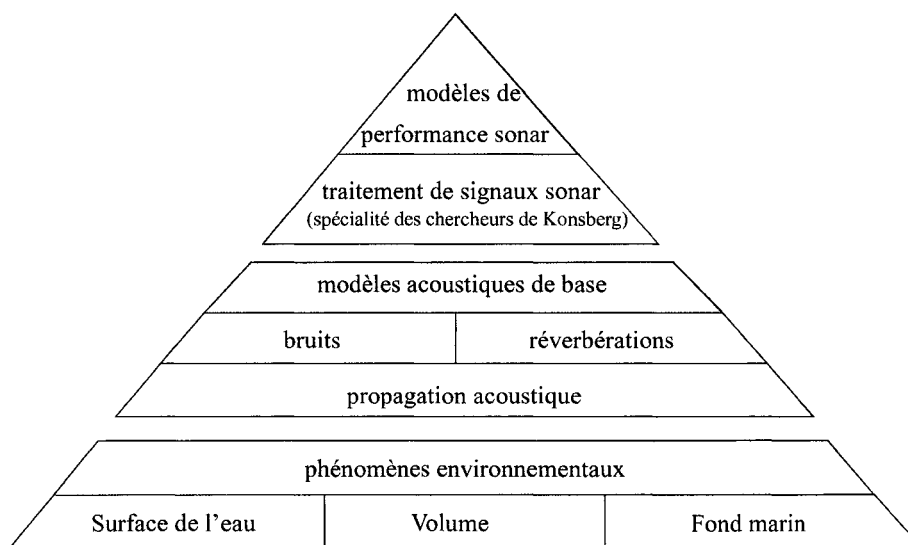


Figure 9 : Organisation hiérarchique des différents phénomènes acoustiques

2.1.1 Phénomènes environnementaux

Cette catégorie regroupe les phénomènes de la mise en relation de l'onde acoustique avec son environnement immédiat : force de réflexion sur le fond marin et sur la surface de l'eau, vitesse de propagation de l'onde dans le volume d'eau, etc. Dans notre cas, puisque l'amplitude des échos ne nous est pas disponible, le seul phénomène qui nous concerne est la vitesse du son dans l'eau. En effet, pour mesurer une distance à l'obstacle, un sonar utilise la technique de la moitié du temps de trajet aller-retour. Ainsi, dans un environnement où la vitesse de propagation peut varier significativement, il est important de pouvoir estimer sa valeur au moment de la prise de mesure.

Wong [6] explique que la vitesse de propagation acoustique dans l'eau dépend de quatre facteurs : la température de l'eau, la pression ambiante et la salinité (les deux premiers dépendant de façon non-linéaire de la profondeur), sans parler des éléments perturbateurs comme les courants. Il est donc très difficile de pouvoir établir une formule théorique pour calculer cette valeur de vitesse. La communauté scientifique a plutôt fait appel à des batteries de mesures de ces trois paramètres et de la vitesse correspondante (voir graphique 2) afin de développer des relations polynomiales plus ou moins précises et valides sur une plus ou moins grande plage de chaque paramètre. La plus utilisée actuellement est celle de l'UNESCO (développée par Chen [7] et mise à jour par Wong [6] en utilisant le nouveau standard de température ITS-90). Son intervalle de validité est $0 \leq S \leq 40$ PSU pour la salinité, $0 \leq t \leq 40^\circ\text{C}$ pour la température, et $0 \leq P \leq 1000$ bars pour la pression.

$$c(S, t, P) = C_w(t, P) + A(t, P)S + B(t, P)S^{3/2} + D(t, P)S^2 \quad (2.1)$$

avec :

c : vitesse du son dans l'eau

S : salinité de l'eau

t : température de l'eau

P : pression de l'eau

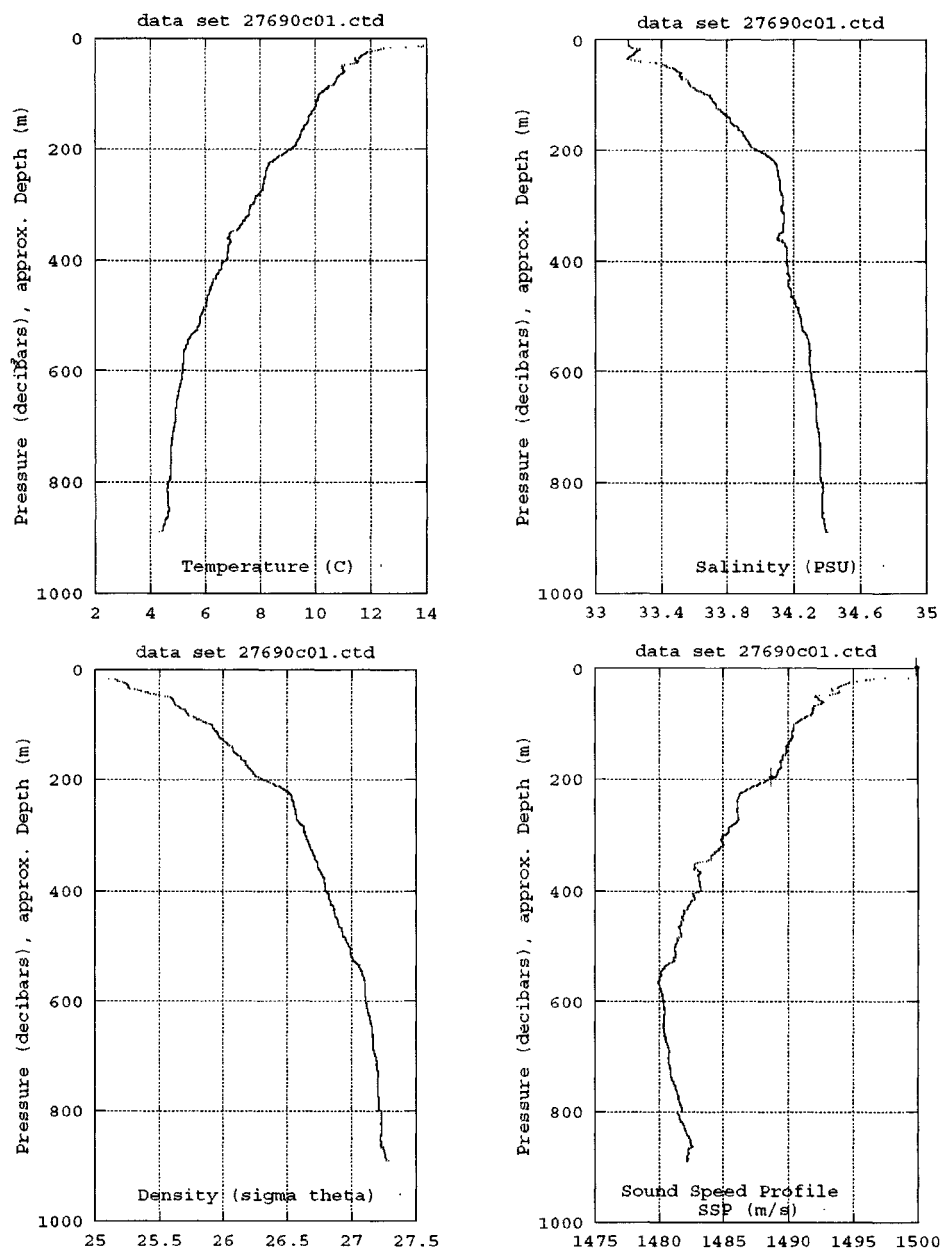
et (coefficients C_{00} - C_{32} , A_{00} - A_{32} , B_{00} - B_{11} , D_{00} , D_{10} non-reproduits) :

$$\begin{aligned} C_w(t, P) = & (C_{00} + C_{01}t + C_{02}t^2 + C_{03}t^3 + C_{04}t^4 + C_{05}t^5) \\ & + (C_{10} + C_{11}t + C_{12}t^2 + C_{13}t^3 + C_{14}t^4)P \\ & + (C_{20} + C_{21}t + C_{22}t^2 + C_{23}t^3 + C_{24}t^4)P^2 \\ & + (C_{30} + C_{31}t + C_{32}t^2)P^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_w(t, P) &= (C_{00} + C_{01}t + C_{02}t^2 + C_{03}t^3 + C_{04}t^4 + C_{05}t^5) \\
&\quad + (C_{10} + C_{11}t + C_{12}t^2 + C_{13}t^3 + C_{14}t^4)P \\
&\quad + (C_{20} + C_{21}t + C_{22}t^2 + C_{23}t^3 + C_{24}t^4)P^2 \\
&\quad + (C_{30} + C_{31}t + C_{32}t^2)P^3 \\
A(t, P) &= (A_{00} + A_{01}t + A_{02}t^2 + A_{03}t^3 + A_{04}t^4) \\
&\quad + (A_{10} + A_{11}t + A_{12}t^2 + A_{13}t^3 + A_{14}t^4)P \\
&\quad + (A_{20} + A_{21}t + A_{22}t^2 + A_{23}t^3)P^2 \\
&\quad + (A_{30} + A_{31}t + A_{32}t^2)P^3 \\
B(t, P) &= B_{00} + B_{01}t \\
&\quad + (B_{10} + B_{11}t)P \\
D(t, P) &= D_{00} + D_{01}P
\end{aligned}$$

Le graphique 2 nous montre des courbes de mesures de ces quatre informations. Dans cette étude³, et dans l'intervalle de profondeur qui nous intéresse, de 0 à 200 m, la vitesse de propagation est d'environ 1500 m/s à la surface et chute à 1487 m/s (quatrième graphique avec les indicateurs en vert). Cette variation de 12 m/s peut sembler faible, mais nous allons voir plus loin quelle pourrait être justement suffisamment significative pour ne pas pouvoir être négligée.

³ Pour le besoin d'illustration du présent document, cette figure a été tirée de la thèse de M. Donald P. Brutzman dans le cadre de la maîtrise du Naval Postgraduate School.



Graphique 2 : Courbes de température, salinité, pression et vitesse de propagation dans la baie de Monterey (sept. 1990)

2.1.2 Propagation de l'onde acoustique

Un sonar est toujours composé d'un émetteur et d'un récepteur, bien que ces deux fonctions puissent être accomplies à tour de rôle par le même appareil. L'émetteur crée un front d'onde qui se propage dans l'eau, heurte un objet et revient à l'appareil sous forme d'échos réfléchis. Cette catégorie de phénomènes acoustiques se concentre sur les caractéristiques de propagation de l'onde à travers un volume d'eau.

Idéalement, la trajectoire de l'onde serait identique à l'aller comme au retour et rectiligne. La première condition est évidemment très difficile à vérifier, et nous pouvons également montrer qu'en général, la deuxième n'est pas vraiment respectée non plus. En effet, selon la loi de Snell (voir figure 10), une onde traversant une frontière entre deux milieux, dont les vitesses de transmission diffèrent, se verra déviée selon un angle qui dépendra de la différence entre les deux vitesses de transmission :

$$\frac{\sin \vartheta_1}{c_1} = \frac{\sin \vartheta_2}{c_2} \quad (2.2)$$

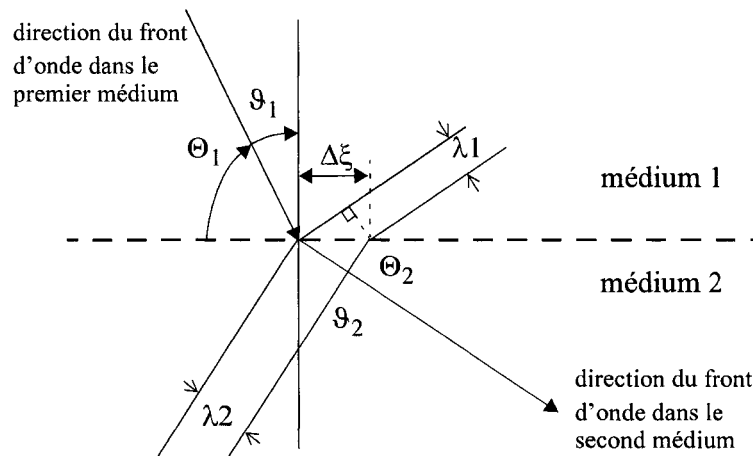


Figure 10 : Aspect géométrique de la loi de Snell

Puisque la vitesse du son dans l'eau varie graduellement avec la profondeur, on peut généraliser le phénomène de la diffraction bi-médium à un environnement variant de façon con-

tinue et montrer la courbure, dans les trois dimensions, que doivent suivre les ondes acoustiques.

Pour mieux saisir cette courbure, certains modèles mathématiques ont été développés afin de calculer les déviations continues impliquées. Selon Etter [5] nous pouvons classer ces modèles en cinq catégories correspondant aux cinq hypothèses simplificatrices possibles de l'équation de l'onde : la théorie des rayons, le mode Normal, l'expansion multi-trajectoires («multipath expansion»), l'intégration des numéros d'onde («wavenumber intégration») et l'équation parabolique. Toutes ces approximations cherchent à expliquer de façon élégante une certaine gamme des propriétés de l'équation de l'onde générale afin d'être aisément appliquée à différentes circonstances. La plus simple d'entre elles est la théorie des rayons qui permet de se concentrer sur la trajectoire de propagation.

L'algorithme retenu pour vérifier la validité du simulateur de sonar est nommé « Ray Recursive Acoustics » (RRA). Choisi pour sa relative simplicité et sa rapidité de calcul, il fait appel à la théorie des rayons et utilise la version fréquentielle de l'équation de l'onde (équation d'Helmholtz), $\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0$, dans laquelle on assume la forme $\phi = A e^{iP}$ (avec A : amplitude et P : phase de l'onde). En séparant les parties imaginaires et réelles nous obtenons une équation représentant la géométrie de la propagation et une autre son amplitude (la première est à la base de l'algorithme RRA justement) :

$$\begin{aligned} \frac{1}{A} \nabla^2 A - [\nabla P]^2 + k^2 &= 0 \\ [\nabla A \cdot \nabla P]^2 + A \nabla^2 P &= 0 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Pour une présentation complète de toutes ces méthodes voir Etter [5].

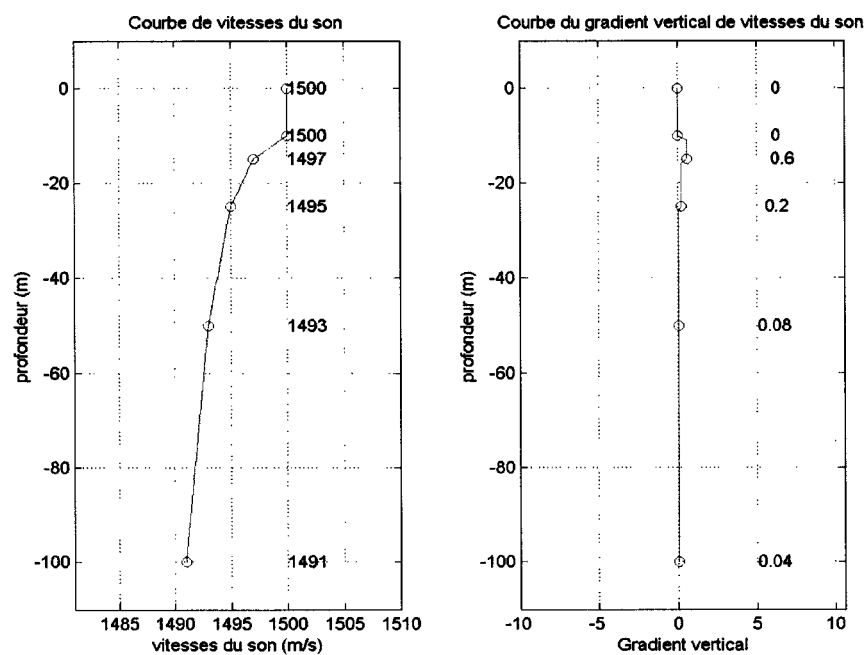
Il existe de nombreux algorithmes de modélisation de trajectoires acoustiques : CAPARAY, FACT, GAMARAY, RANGER, etc. (voir Etter [5] pour des références individuelles) capables de représenter correctement un grand nombre de phénomènes particuliers, mais ils sont lourds en calcul. Le RRA de Ziomek [8] permet de calculer la trajectoire complète des

rayons acoustiques de manière itérative et avec le degré de précision désiré sans se soucier de l'amplitude de ceux-ci. Il calcule la position suivante dans le temps (à pas fixe ou variable, au besoin) du front d'onde d'un rayon individuel à partir d'une déviation par diffraction, introduite par un gradient dans le champ scalaire de vitesse du son, ou par réflexion sur une surface. Ses avantages sont :

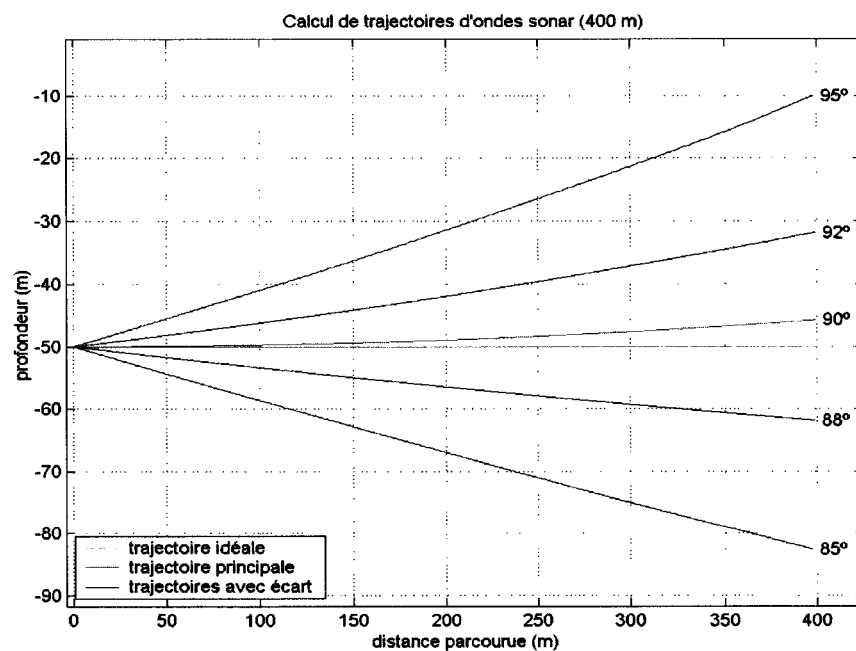
- a. la parallélisation possible des calculs (vu qu'un résultat intermédiaire ne dépend que du précédent et de la table des valeurs de vitesse);
- b. la faible accumulation d'erreur de calcul par linéarisation;
- c. il peut être adapté pour modéliser une diffraction dans les trois dimensions : vitesses de propagation différentes en tous points et donc apparition de diffraction latérale.

Le graphique 3 montre une courbe de vitesses linéarisée du graphique 2 et son gradient vertical (une valeur positive implique une diffraction locale vers la surface). Le graphique 4 montre des trajectoires issues du même point de coordonnées $[0, 0, -50]$, mais d'angles initiaux légèrement différents variant de $\pm 2^\circ$ à $\pm 5^\circ$. Ces rayons représentent une série de scans pendant que le sous-marin oscille légèrement sur son assiette autour du plan horizontal. Comme nous pouvons le constater, à grande distance la courbure des rayons devient importante et les échos reçus des obstacles rencontrés ne seront pas correctement référencés en position si une correction de profondeur ne leur est pas appliquée.

Le tableau I indique les valeurs de profondeur des trajectoires à différentes distances de parcours, ainsi que la taille du demi-cône de réception à ces distances. Pour mieux visualiser l'effet de diffraction vers la surface, le graphique 5 montre un calcul de trajectoires basé sur une courbe de vitesses beaucoup plus accentuée. Les rayons sont tellement recourbés, qu'ils vont se réfléchir sur la surface de l'eau.



Graphique 3 : Courbe de vitesses linéarisée des mesures de Monterey et gradient vertical

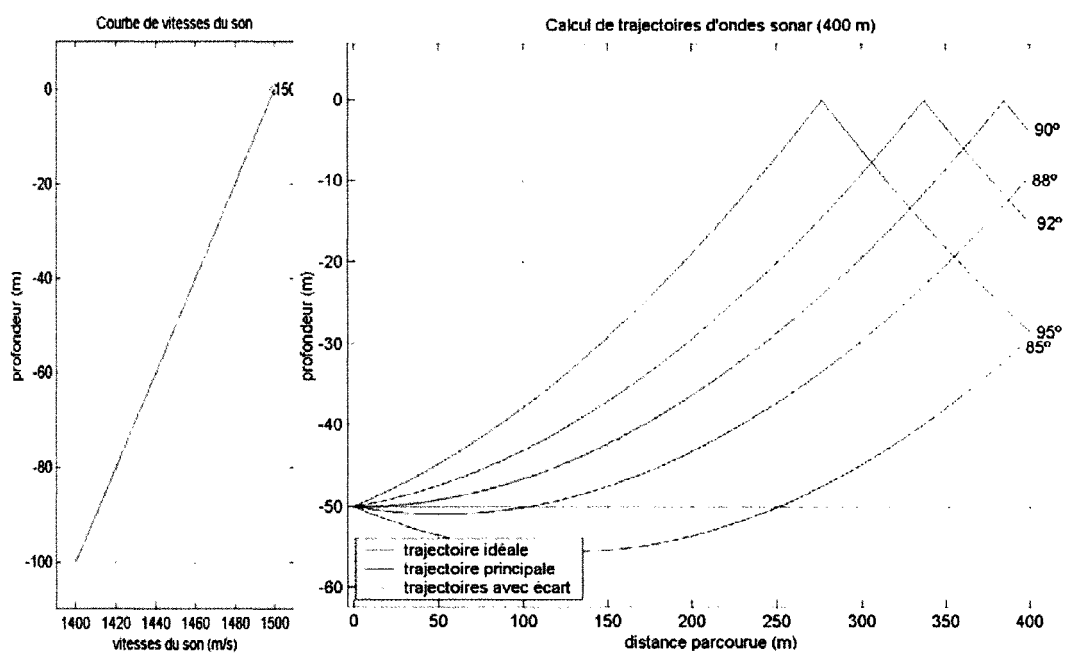


Graphique 4 : Trajectoires rectilignes et déviées en distance parcourue selon une certaine courbe de vitesses

Tableau I

Profondeur de parcours de différentes
trajectoires à partir d'une position initiale de -50 m

Angle de départ degré	Profondeur (à 15 m) m	Écart à la trajectoire idéale m	Demi-cône de réception d tan(0, 75°) m	Profondeur (à 400 m) m	Écart à la trajectoire idéale m	Demi-cône de réception d tan(0, 75°) m
95°	-48,7749	1,2251	-	-10,0111	39,9889	-
92°	-49,5065	0,4935	-	-31,8141	18,1859	-
90°	-49,9951	0,0049	0,1964	-45,7453	4,2547	5,2363
88°	-50,4862	-0,4862	-	-61,7953	-11,7953	-
85°	-51,2177	-1,2177	-	-82,6323	-32,6323	-



Graphique 5 : Trajectoires fortement déviées par un gradient de vitesses accentué

Mais avons-nous vraiment besoin d'appliquer une correction? Considérant la grandeur des surfaces à couvrir, il est souvent nécessaire de prendre un certain recul pour que le cône de réception du sonar couvre plus de largeur; les échos reçus ne seront donc pas ceux des obstacles directement devant. Ce facteur ne sera pas le seul qui entraînera une diminution significative de l'indice de confiance en ces données. On peut également voir que le cône entraînera à lui seul une incertitude du même ordre de grandeur que la diffraction. Bien que ces deux erreurs ne s'englobent pas mais s'additionnent, celle du cône suffit à augmenter l'imprécision totale. Par conséquent, l'incidence de ces géométries, obtenues à grande distance, sera faible durant leur unification avec d'autres, plus proches.

Quoi qu'il en soit, puisqu'au moment d'écrire ces lignes aucun vélocimètre⁴ (voir photo 5⁵) n'est installé sur le sous-marin pour une cueillette de données sur le terrain, nous devons nous contenter du profil de vitesses vu précédemment et le supposer semblable à ce que nous aurions obtenu nous-même.

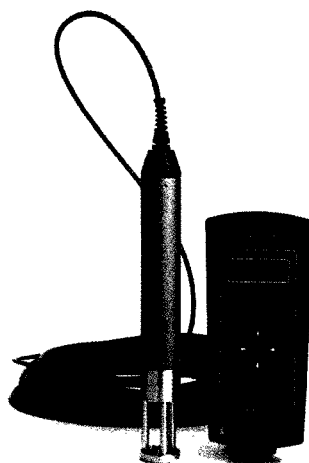


Photo 5 : Vélocimètre DIGIBAR-PRO de la compagnie
Odom Hydrographic Systems

⁴ Une autre façon d'obtenir la vitesse du son serait de mesurer la salinité de l'eau (en la considérant uniforme dans tout le bassin) et d'installer un capteur de température sur le sous-marin afin de pouvoir utiliser l'équation 2.2.

⁵ Voir www.odomhydrographic.com.

2.1.3 Bruits et réverbération

Le milieu sous-marin étant loin d'être idéal et infini, il faut naturellement s'attendre à certaines perturbations de l'onde émise ou de son écho au retour. Cette catégorie de phénomènes acoustiques s'intéresse aux différentes conditions qui pourraient modifier l'onde parfaite et même créer de faux échos indésirables.

Les éléments perturbateurs pouvant créer une distorsion de l'écho sont nombreux : bruit de fond ambiant, activité sismique, autres bateaux et sonars à proximité, habitants aquatiques locaux, vent et pluie en surface, bulles en suspension, etc. Un grand nombre de modèles plus ou moins empiriques ont été proposés dans la littérature pour modéliser et prédire les effets de ces bruits. Dans notre situation, avoir la capacité de les prédire est de peu d'intérêt : le simulateur n'en a pas vraiment besoin puisqu'il ne cherche pas à calculer l'amplitude des échos. Le seul moment où ces perturbations entrent en ligne de compte est lors des choix des paramètres de seuils pour l'ordinateur sonar, ce qui pourraient faire partie d'une procédure de calibrage de l'équipement.

D'autres perturbateurs vont, au contraire, créer des échos indésirables ou carrément faux. Il peut s'agir de vie marine : bancs d'algues ou de poissons, etc., de grosses particules en suspension, ou tout simplement d'objets flottants entre deux eaux. Ces éléments vont habituellement provoquer de faux échos intermittents, s'étendant sur une faible largeur face au sonar et donc interceptant un nombre restreint de rayons, montrant une distance plus courte que celle du vrai obstacle derrière eux.

On distingue deux approches mathématiques pour estimer, ou simuler, un comportement de bruit intermittent : les disperseurs ponctuels (« point scatterers ») ou volumiques (« cell scatterers »). Le premier modèle garde en mémoire un grand nombre de sources ponctuelles et calcule en tout temps la contribution de chacun aux « rayons sonar », tandis que le second, le plus communément utilisé, sépare l'environnement en sections de volume et leur

attribue un pourcentage de probabilité de rencontrer un élément disperseur. Il ne reste plus qu'à sommer la multiplication des pourcentages des différentes cellules rencontrées aux distances parcourues à travers celles-ci sur le parcours des rayons sonars. Ce pourcentage total peut alors servir de valeurs seuils à un générateur de nombres aléatoires pour déterminer la présence d'un faux écho. Un dernier nombre aléatoire est utilisé pour la nouvelle distance plus courte.

2.1.4 Performance du sonar

Le milieu ambiant atténue l'onde, la dévie, la réverbère et la multiplie. Ces phénomènes viennent modifier et déformer le signal d'écho reçu. Il est important de considérer tous ces facteurs lorsque l'on veut spécifier les paramètres de fonctionnement d'un sonar. Cette catégorie de phénomènes acoustiques tente de spécifier et d'expliquer les différents processus de traitement de signaux nécessaires pour reconnaître l'écho désiré parmi le bruit ambiant et les dédoublements indésirables.

En tant qu'utilisateur du sonar SM2000, toute cette section ne se traduit pour nous qu'en une série de paramètres de calibrage du sonar qu'il faut ajuster. Par contre, si nous avions eu accès aux courbes d'amplitude temporelles, cette information aurait pu être utile au filtrage des données sonar brutes, comme nous allons le voir au chapitre 4.

Le lecteur intéressé pourra consulter Urick [2] et Etter [5] pour plus de détails.

2.2 Indice de confiance des données sonar

Maintenant que nous avons une meilleure idée de la façon dont les ondes acoustiques voyagent dans l'eau, nous pouvons tenter de prévoir où la diffraction aura lieu, afin de pouvoir formuler un indice de confiance des données mesurées : 1) à quel point nous sommes sûrs

que la mesure obtenue correspond à un objet en ligne droite en avant du sonar et 2) la justesse de la distance calculée à l'aide du temps de trajet.

2.2.1 Précision longitudinale des mesures de distance

La précision d'une mesure de distance sonar dépend essentiellement de trois facteurs :

- a. la fréquence d'horloge du compteur de temps de parcours du sonar;
- b. notre bonne connaissance de la vitesse exacte du son dans l'eau;
- c. la diffraction des rayons acoustiques, causée par des variations locales de la vitesse.

Selon le manufacturier du SM2000, la précision longitudinale maximale devrait être de l'ordre de 0,02 m.

Puisque la mesure de distance est basée sur un calcul du temps de trajet, la fréquence de l'horloge d'incrément du compteur de délais est importante. Afin de maximiser la précision des mesures à courte distance, le compteur offre plusieurs fréquences d'opération. Ainsi, le contenu du registre atteint sa valeur maximale en différentes portées. Donc, un incrément de ce registre peut équivaloir à différentes variations de mesure de distances. Cette fréquence est heureusement disponible dans le paquet sériel envoyé par l'ordinateur sonar au moment d'un scan. En considérant la vitesse v_s constante, nous pouvons alors donner la précision longitudinale en prenant la moitié de l'incrément :

$$p_{\text{long}} = \pm \frac{0,5}{2 \cdot f_c} \cdot v_s \quad (2.4)$$

où : f_c : fréquence d'opération du compteur de délais

v_s : vitesse du son dans l'eau

La vitesse du son dans l'eau est un paramètre auquel il est difficile d'attribuer un coefficient de confiance puisqu'elle varie en tous points. Nous devons donc nous contenter de la précision de l'appareil de mesure au point d'émission. Heureusement, si une valeur arbitraire est utilisée a priori, toutes les mesures en seront affectées de la même façon.

Finalement, la précision de la mesure de distances peut être réduite par les légères variations de vitesse de propagation sur le parcours des rayons. Il est tout aussi difficile de prédire la position des différents endroits où il y a une telle variation, mais nous pouvons quand même estimer que plus cette distance est longue, plus elle a de chance d'en rencontrer sur son parcours. C'est pourquoi un facteur de confiance empirique, avec une valeur initiale de 1 et diminuant asymptotiquement vers 0 avec la distance (d), est proposé :

$$fc_{\text{dist}} = e^{(-d/100)} \quad (2.5)$$

La valeur 100 a été choisie pour offrir un compromis entre une chute lente vers 0 et une valeur de moins de 0,1 à 400 mètres. Si nous savons que le bassin d'un site d'inspection est particulièrement turbulent, il est possible de réduire cette valeur de façon à faire chuter plus rapidement le facteur de confiance.

2.2.2 Précision latérale des mesures de distance

La précision latérale est constituée essentiellement de la considération géométrique de la séparation des rayons par un angle de $0,9448^\circ$.

Nous pourrions également prendre en compte la diffraction latérale des rayons, mais puisque la vitesse du son a été considérée constante en tout point X-Y pour une profondeur donnée, ce phénomène ne peut se produire.

2.2.3 Précision transversale des mesures de distance

La précision transversale, tout comme la précision latérale, est constituée essentiellement de la considération géométrique de la largeur transversale du cône de réception du sonar, soit $1,5^\circ$.

Il serait bon dans ce cas de considérer la diffraction verticale des rayons, mais puisque nous n'avons pas de mesures de vitesses du son à notre disposition, il est impossible de la calculer et d'en tenir compte.

2.2.4 Précision acoustique totale

La précision acoustique totale peut donc être représentée par un secteur sphérique d'orientation quelconque, quoique le plus souvent horizontal :

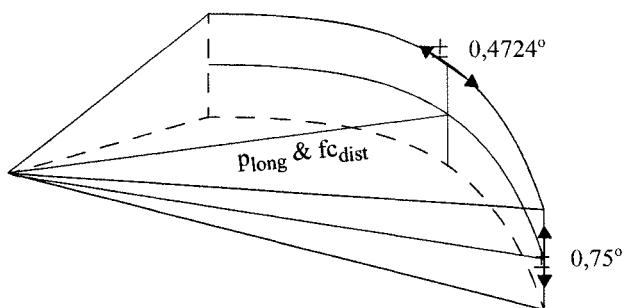


Figure 11 : Secteur sphérique de la précision acoustique totale

Par contre, pour faciliter l'intégration de ces valeurs à celles de l'étape de référencement du chapitre 3, il serait bon de les convertir en valeurs de précision selon les axes de coordonnées cartésiennes. Nous utiliserons l'équation qui a été développée dans ce chapitre et l'orientation de chaque rayons.

2.3 Discussion

Dans ce chapitre nous avons révisé les principaux facteurs influençant la propagation acoustique et le temps de trajet aller-retour entre le sonar et une cible. Nous avons vu que les sources d'imprécision des mesures sonar sont nombreuses, difficiles à quantifier, et dans la plupart des cas augmentant avec la distance de l'objet. Heureusement, puisque dans le cadre normal d'opération du sous-marin nous restons à courte portée des surfaces du barrage, leur influence est moindre et peut bien souvent être négligée.

Principales contributions personnelles

Établir la précision d'une mesure implique l'attribution d'un intervalle d'écart à la valeur idéale pour chacun des facteurs influençant le résultat final. Malheureusement, la plupart des paramètres acoustiques se traduisent difficilement sous cette forme. Pour y remédier, ces facteurs se voient attribuer une valeur dans l'intervalle $[0, 1]$ (1 voulant dire parfaitement précis) et ceux-ci viendront *augmenter* la valeur totale d'écart à l'aide d'une combinaison de la forme : $\text{Ecart}_{\text{total}} \times (1 - \text{Intervalle}_{\text{total}})$.

CHAPITRE 3

SYSTÈME DE POSITIONNEMENT ET DONNÉES SONAR RÉFÉRENCÉES

Une série de mesures de distances ayant été prises et un indice de confiance partiel (facteurs acoustique) évalué pour chacune, la prochaine étape consiste à convertir ces mesures en une série de positions 3D dans le référentiel global du lieu inspecté, choisi arbitrairement au départ, et à établir leur précision finale.

Ce processus se divise en trois parties (voir figure 12) :

- a. une transformation pour convertir ces distances en positions 3D dans le référentiel du sonar grâce à l'orientation de départ de chaque rayon;
- b. une transformation invariante afin de les convertir au référentiel du centre géométrique du véhicule;
- c. une dernière transformation pour les obtenir dans le référentiel global en utilisant la position du sous-marin au moment de la prise des mesures.

Nous allons voir que chacune de ces étapes comporte une précision de transformation ayant plus ou moins d'impact sur la précision finale des éléments du nuage de points résultant. Nous considérerons également que les erreurs d'arrondissement des calculs sont négligeables.

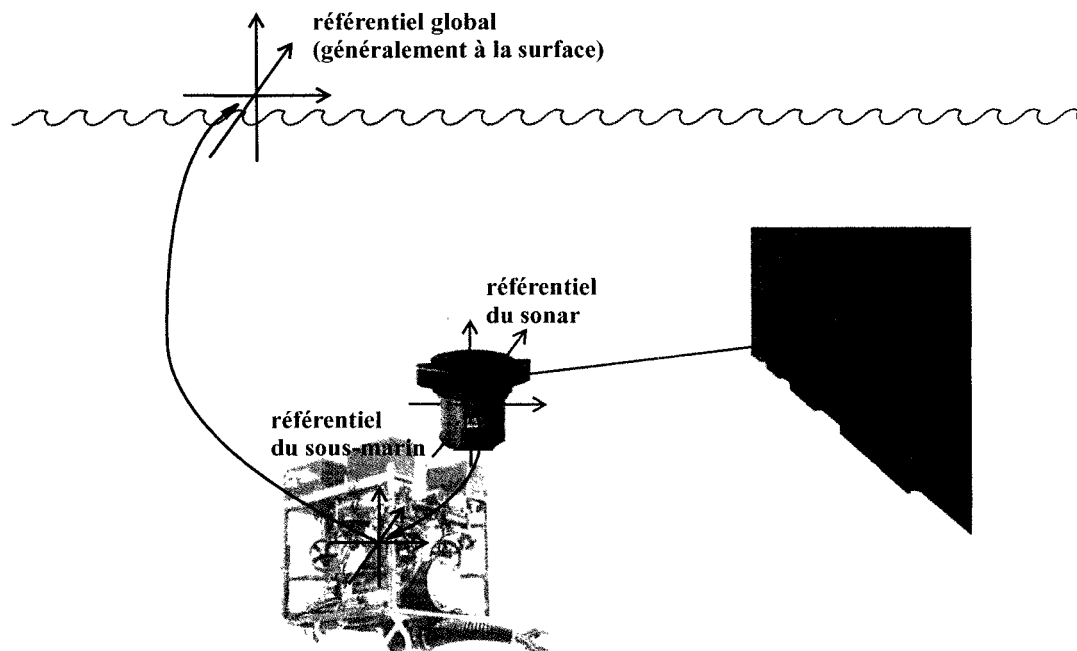


Figure 12 : Référentiels utilisés dans le calcul d'une position 3D globale

3.1 Position 3D d'une mesure sonar

La position spatiale d'une mesure de distance à partir du sonar dépend de deux paramètres : la distance en question et l'orientation du rayon au départ (voir figure 13).

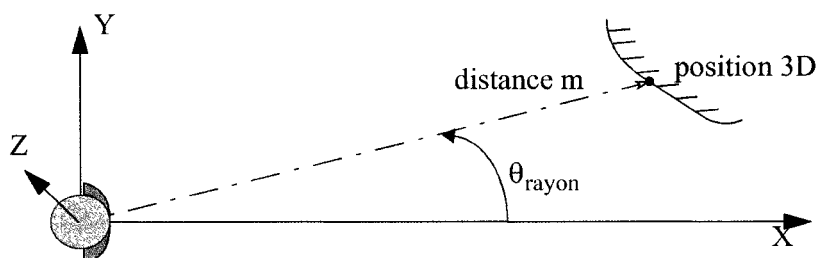


Figure 13 : Paramètres impliqués lors de la conversion d'une mesure de distance sonar en position 3D

Nous pouvons exprimer cette conversion par des matrices de rotation/translation :

$$P(x, y, z) = R_Z \bullet T_X \bullet m = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \cos\theta \\ m \sin\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Dans notre cas, la précision de cette position 3D dépend principalement de celle de la mesure de distance, puisque l'angle du rayon est une conséquence du processus mathématique d'extraction des rayons (« beams forming ») et ne dépend en réalité que de la qualité d'usinage de la tête sonar.

La précision de la mesure de distance dépend à son tour de notre bonne connaissance de la vitesse de propagation du son, afin de convertir l'information brute de temps de trajet, et est déjà prise en compte par les facteurs acoustiques.

3.2 Installation du sonar sur le sous-marin

Cette transformation est essentiellement la même que celle de la section précédente : une rotation et une translation dans les trois axes (angles d'Euler). Mais contrairement au calcul des positions 3D des mesures sonar, les six paramètres peuvent être quelconque et la notation en matrice de transformation homogène est plus pratique.

$$(R_Z R_Y R_X + T_{\text{centre}}) \bullet P(x, y, z) = \left({}^{\text{centre}}_{\text{sonar}} R + T_{\text{centre}} \right) \bullet P_s = H_{\text{sonar}} \bullet P_s = P_c \quad (3.2)$$

La justesse de cette transformation est basée sur un assemblage mécanique fait à la main par des techniciens attentionnés et nous pouvons probablement l'estimer à $\pm 0,2$ cm en position et $\pm 0,5^\circ$ en orientation. Par contre, cette transformation est toujours la même pour toutes les mesures et peut donc être négligée, puisque le but du calcul de précision est d'établir une relation de différence de celle-ci entre différents groupes de mesures.

3.3 Position et orientation du sous-marin

Finalement, grâce à la position du sous-marin au moment de la réception des informations du scan, il est possible de convertir chaque mesure au référentiel global :

$$(R_Z R_Y R_X + T_{\text{global}}) \bullet P_c = ({}^{\text{global}}_{\text{centre}} R + T_{\text{global}}) \bullet P_c = H_{\text{centre}} \bullet P_c = P_g \quad (3.3)$$

Il existe plusieurs techniques afin de mesurer, ou sinon d'estimer, la position d'un objet en déplacement. Chacune tente de répondre aux contraintes de positionnement en différentes circonstances d'opération et différents environnements. En voici quelques-unes parmi les plus utilisées :

- a. le GPS : met en commun un calcul de distance à une balise, de position connue, pour au moins quatre satellites en orbite autour de la Terre. Cette technique, très performante, contraint de rester à ciel ouvert afin de capter les signaux et n'est pas applicable au milieu sous-marin;
- b. le « Dead Reckoning » : totalise des segments de déplacement fait par le véhicule, que ce soit des tours de roues ou des pas. Malheureusement, cette technique est de faible performance à cause des erreurs d'intégration et de trop nombreuses erreurs de mesures par glissement des points de contact au sol. Elle n'est pas applicable au sous-marin non plus;
- c. les balises ultrason : il s'agit de la même astuce que le GPS, mais à l'aide de signaux ultrasons plutôt que radios. Puisque le son voyage beaucoup moins vite que les ondes radio et qu'il est plus facilement dévié, la précision en est réduite. Par contre, cette technique est tout à fait indiquée pour les environnements aquatiques.
- d. la centrale inertielle : semblable au « dead reckoning », mais par accumulation des accélérations linéaires et angulaires instantannées subies par le corps. Plus besoin de contact à une surface. Malheureusement, les erreurs d'arrondissement sont tout aussi présentes et la position estimée tend à dériver avec le temps.

Dans le cas du sous-marin ROVIII, un système de positionnement complexe, qui combine les avantages de plusieurs capteurs afin d'en limiter les inconvénients, est utilisé. Les prochains sous-chapitres vont en expliquer les principales composantes, ainsi que la méthode mathématique pour les combiner.

3.3.1 Équipements utilisés et leur précision respective

À cause de l'imprévisibilité locale de transmission des ondes acoustiques, il est très difficile, en milieu aquatique, de connaître sa position. C'est pourquoi le système de positionnement d'un véhicule sous-marin ne fait rarement confiance qu'à un seul capteur : il est impensable que celui-ci soit en mesure de fournir une information juste et rapide en toutes circonstances. Voici donc une liste des instruments de mesure les plus importants qui sont installés sur ROVIII :

- a. Système de localisation acoustique : tout comme pour le sonar, le module de reconstruction n'est pas limité à un modèle spécifique, mais l'équipement utilisé au moment d'écrire ces lignes sera décrit ici. L'AquaMap ROV^{MC} de la compagnie DesertStar [11] (voir photo 6⁶) a été conçu en configuration «long base line»⁷ (LBL) et permet de déterminer la position d'un sous-marin à l'aide de trois balises flottantes (voir figure 14⁸) de positions connues et d'un émetteur-récepteur installé sur le véhicule. Les trois balises renvoient une confirmation après avoir reçu le signal de départ de la cible embarquée, ce qui permet à celle-ci de calculer sa propre position par décalage temporel entre les trois balises.

⁶ Voir <http://www.desertstar.com/newsite/positioning/rov/aquarov.html>

⁷ Pour une description des différents types de configurations, vous pouvez consulter la page Web <http://www.sonardyne.co.uk/theory.htm>

⁸ Pour les besoins d'illustration du présent document, cette figure a été tirée du manuel de l'opérateur du système AquaMap^{MC} de DesertStar Systems.

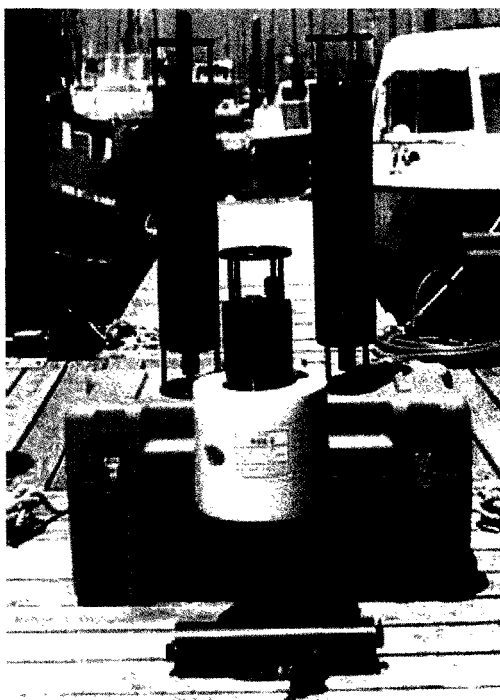


Photo 6 : Équipement du système AquaMap[©]

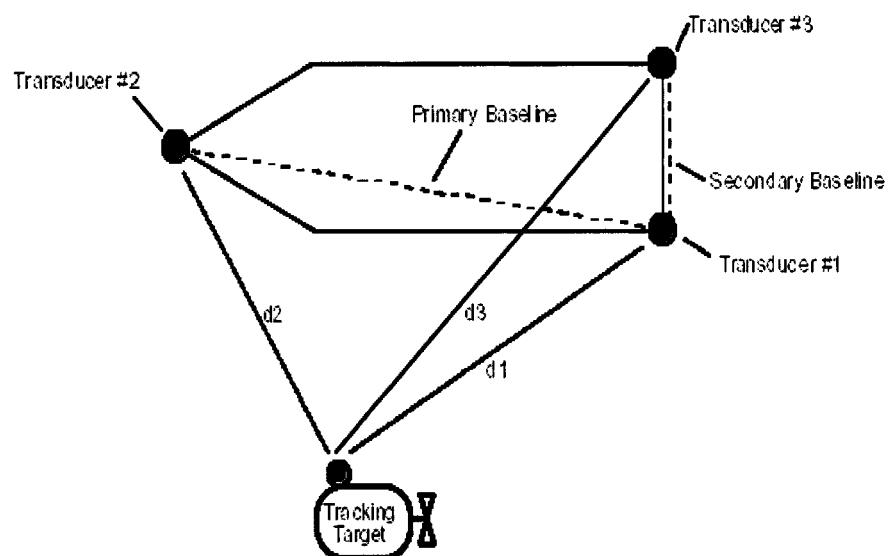


Figure 14 : Géométrie de disposition des balises du système AquaMap[©]

Finalement, on transpose cette position 3D dans le référentiel du centre géométrique du sous-marin, en sachant où sur sa structure le récepteur a été fixé.

Selon les spécifications du fabricant, et des essais sur le terrain, on estime à ± 15 cm dans les trois axes la précision disponible. Malheureusement, la fréquence de mesure de ce type de configuration est relativement lente (~ 3 à 5 sec selon l'éloignement des balises). En plus, le degré de précision dépend de plusieurs facteurs :

1. La précision de la position de chacune des balises : malheureusement elle est souvent difficile à mesurer par l'opérateur, de l'ordre du centimètre quand c'est possible, et oscille légèrement avec les vagues à la surface de l'eau. Le système possède la capacité d'évaluer cette information (écartement entre les balises) mais son bon fonctionnement semble être discutable;
2. Une bonne connaissance de la vitesse du son dans l'eau : variant de 1400 à plus de 1600 m/s. Il s'agit d'un paramètre très dynamique, comme nous avons pu le voir au chapitre 2, et le système n'accepte qu'une seule information fixe, car il ne possède pas de fonction d'auto-calibrage;
3. Recalage du référentiel du système de localisation avec le global : puisque la position des balises est difficile à vérifier, on ne peut être certain de la conversion de la position retournée au référentiel du barrage. Pour minimiser cette source d'erreur, une procédure de calibrage a été utilisée. Le sous-marin est placé dans une orientation initiale et la matrice de conversion est complétée afin de réduire à 0 ce que retourne l'AquaMap. Ainsi, peu importe la position exacte des balises par rapport au barrage.

Par contre, il ne faut pas oublier que cette méthode ne corrige pas la part d'imprécision de la position retournée en d'autres endroits en présence d'un éventuel facteur d'échelle entre les deux référentiels.

- b. bathymètre : un capteur de pression ambiante capable de donner la profondeur du véhicule grâce à une relation quasi-linéaire entre les deux. Ce dispositif est très précis (± 1 cm), rapide et offre une bonne répétabilité.
- c. digital quartz inertial measurement (DQI) : une centrale inertielle donnant les vitesses angulaires et linéaires. Ce type de capteur est très rapide et offre une bonne résolution (0,1 m/s et 0,001 rad/s). Par intégration de chacun des axes, il est possible d'obtenir la position 3D du module. Cependant, la numérisation de l'information entraîne souvent un effet d'accumulation d'erreur et une dérive peut être observée.
- d. doppler velocity log (DVL) : un instrument capable de déterminer la vitesse d'un courant ou sa propre vitesse de déplacement par rapport à une surface (dans notre cas le fond), grâce à une évaluation de l'effet Doppler sur des ping sonar. Sa précision sur la vitesse transversale est de ± 1 cm/s. Sa rapidité est acceptable, malgré l'utilisation du principe de temps de trajet aller-retour du sonar, puisque pour son bon fonctionnement il doit se trouver à courte portée de la surface.

3.3.2 Combinaison du système de localisation acoustique et des autres capteurs

Le système de localisation acoustique souffre d'un taux de rafraîchissement lent de la position mesurée et sa précision/répétabilité n'est pas excellente. C'est pourquoi il a été décidé de combiner cette information à celles des autres capteurs embarqués, qui offrent des caractéristiques différentes et complémentaires, afin d'affiner notre estimation de la position du véhicule dans l'espace. La méthode la plus utilisée pour cette opération de fusion est le filtre de Kalman (voir Blain [12], Mehra [13] et Magill [14]). Il permet de combiner statistiquement les informations des capteurs relatifs et rapides, souffrants d'erreurs d'arrondissement, aux capteurs plus lents, mais absolus et de plus faibles bruits, afin d'obtenir une estimation plus juste.

La précision observée diffère selon les 6 axes de liberté dépendamment des différents capteurs applicables à chacun d'entre eux. La profondeur (Z) et l'orientation (Ox-Oy-Oz) sont excellentes puisque directement obtenues des bathymètre et DQI. Par contre, la position dans le plan (X-Y) est de moindre précision (± 10 cm), mais quand même meilleure que l'originale du système de localisation.

3.4 Précision des mesures référencées

Maintenant que nous avons les valeurs de précision de chacune des composantes de la conversion des mesures de distance sonar en positions 3D globales, nous allons voir comment les combiner géométriquement et mathématiquement en une seule information.

Nous avons obtenus jusqu'à maintenant la précision cartésienne des facteurs acoustiques et celle du processus de référencement. Pour obtenir une précision totale, il suffit d'additionner les différentes valeurs pour chacun des axes. Afin de combiner cette valeur totale avec les facteurs de confiance il faudrait dévaluer la précision en augmentant le nombre final. Nous pouvons les multiplier à l'aide de la formule suivante :

$$p_t = \sum p_x + \alpha(1 - \prod fc_x) \quad (3.4)$$

où :

p_t : précision totale d'un axe

p_x : chacune des précisions d'un axe

fc_x : chacun des facteurs de confiance d'un axe

α : facteur d'amplification de la précision

Ainsi, un facteur de bonne confiance (proche de 1) ne changera pas la somme des précisions, et une mauvaise confiance augmentera celle-ci grâce au facteur d'amplification.

3.5 Transformation des coordonnées spatiales

La conversion du référentiel d'une position 3D vers un autre référentiel est facilement réalisée à l'aide de matrices en coordonnées homogènes. Cette méthode est utilisée dans ce projet :

Soit deux référentiels R_1 et R_2 , dont on connaît la différence de position (t_x, t_y, t_z) et d'orientation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$).

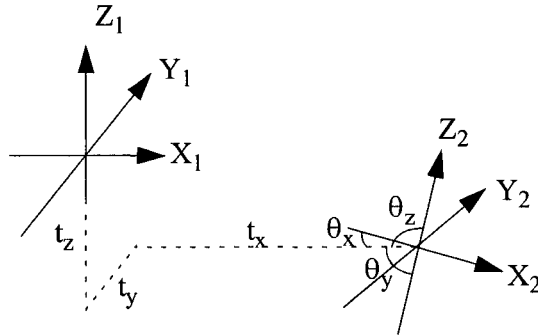


Figure 15 : Relation de translation et de rotation entre deux référentiels

La matrice de transformation est :

$${}^2_H = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & t_x \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & t_y \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

où :

H : la transformation homogène totale

t : le vecteur de translation

r : la matrice 3 x 3 de rotation suivante :

$$r = \begin{bmatrix} \cos\theta_y \cos\theta_z & \sin\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z - \cos\theta_x \sin\theta_z & \cos\theta_x \sin\theta_y \cos\theta_z + \sin\theta_x \sin\theta_z \\ \cos\theta_y \sin\theta_z & \sin\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z + \cos\theta_x \cos\theta_z & \cos\theta_x \sin\theta_y \sin\theta_z - \sin\theta_x \cos\theta_z \\ -\sin\theta_y & \sin\theta_x \cos\theta_y & \cos\theta_x \cos\theta_y \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

3.6 Discussion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue les différents référentiels impliqués dans la conversion d'une mesure de distance sonar en une position 3D dans l'espace global du site inspecté.

Nous avons également vu comment le système de positionnement arrive à améliorer son estimation de la position du véhicule en se servant de multiple capteurs, et la fiabilité de ces équipements.

Finalement, les précisions 3D des étapes de référencement des mesures sonar ont été combinées aux paramètres d'imprécision acoustique pour obtenir une valeur totale valable qui sera utile à l'étape de l'unification de surfaces.

CHAPITRE 4

FILTRAGE DES DONNÉES SONAR BRUTES

La courte revue de théorie de la propagation acoustique du chapitre 2 nous a permis de constater que, même sans se soucier de l'amplitude des échos, les sources de bruits présentes dans un signal sonar sont nombreuses : réfraction de l'onde, réverbération vers l'émetteur par des particules en suspension, variations locales de vitesse de propagation, directivité non-optimale de la réflexion des surfaces rencontrées, etc.

Il serait laborieux de comprendre et de classer chacun des types de bruits selon leur origine, d'essayer d'en détecter la présence et de les filtrer individuellement. À l'opposé, nous pouvons plus aisément regrouper leurs effets sur les données brutes en deux catégories (voir figure 16) :

- a. bruits impulsifonnels : écho produit par un petit objet ou une particule en suspension qui intercepte le rayon acoustique avant que celui-ci n'entre en collision avec la véritable surface que l'on veut mesurer. Ce faux écho se traduit par une valeur de distance significativement plus faible que celles de ses rayons voisins dans le profil.
- b. bruits de surface : de faibles variations locales de vitesses de propagation le long des trajectoires des rayons viennent légèrement accélérer ou ralentir ceux-ci. Ces petits changements de vitesse, quasi-indépendants d'un rayon à l'autre, entraînent des différences dans les temps de transport, et donc dans les mesures de distances, et donne l'impression d'un « nuage flou de points » autour de la surface réelle.

Il apparaît évident qu'un filtrage de ces données serait très utile afin de ne pas fausser les géométries obtenues par la suite, en particulier par la forme du bruit impulsifonnelle (une démonstration de la différence est présentée au chapitre 5.3).

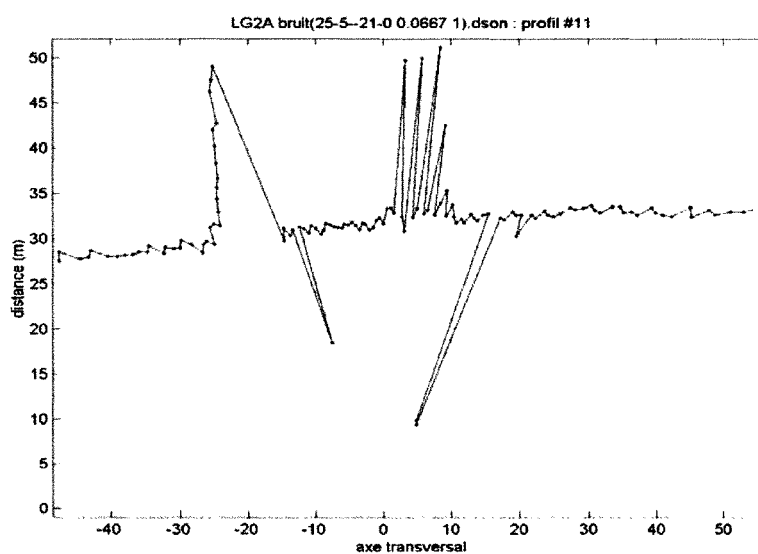
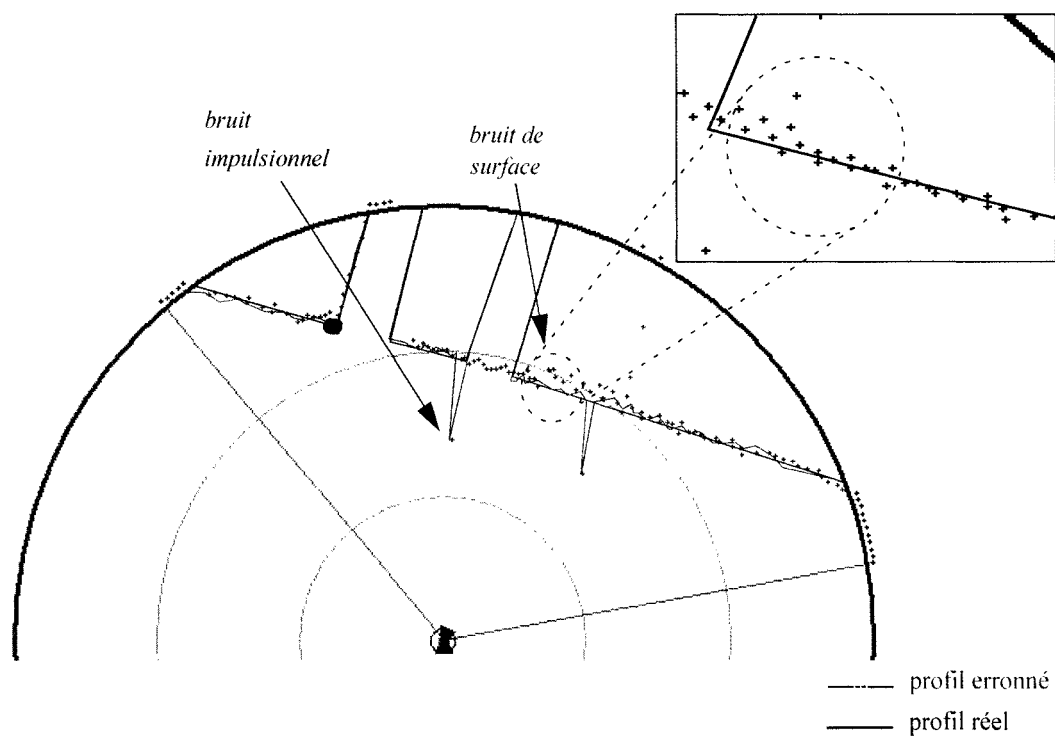


Figure 16 : Données sonar telles que vues par l'opérateur du sous-marin et profil cartésien erroné obtenu à partir de ces informations brutes

Puisque les deux types de bruits ne sont pas issus du même phénomène, et que le résultat obtenu par la plupart des techniques permettant de « lisser » le profil seraient très affectées par la présence de bruit impulsionnel, il serait profitable de les considérer séparément.

Avant de passer en revue les types de filtres utilisables, il faut se rappeler que le système montre deux besoins différents de filtrage : une représentation graphique simple et rapide qui montre les obstacles dans les alentours immédiats du sous-marin; et un filtrage plus complet des données brutes afin de minimiser l'effet du bruit sur les formes obtenues par la suite. Ces deux besoins, d'intérêts opposés, expriment bien la différence entre les processus de filtrage du poste de commande et celui de la méthode de reconstruction.

Pour représenter graphiquement les données à l'écran du sonar le poste de commande ne peut compter que sur les données déjà acquises. Cela impose de se contenter de visualiser la différence entre les données jugées correctes et celles déclarées bruit impulsionnel. Deux couleurs de point différentes sont donc utilisés (voir figure 17). Il est donc quand même possible au pilote, qui est après tout doté d'un sens critique et d'une capacité de détecter des tendances bien supérieures à ceux de la machine, de remarquer et de suivre un objet mince qui aurait été mis à l'écart par le bruit impulsionnel.

Le processus de reconstruction, quant à lui, est non seulement exécuté à la suite du balayage/accumulation en ne demandant qu'une pause des opérations du pilote, mais a aussi accès à toutes les informations obtenues pendant le parcours. Il peut ainsi se permettre d'utiliser la mise en relation spatiale et temporelle des profils consécutifs.

Il est également important de noter que n'importe quel type de filtrage 1D implique l'utilisation de données bijectives : une seule valeur en ordonnée pour chaque abscisse. Comme nous ne pouvons garantir cette contrainte en représentation cartésienne des données référencées (remarquez le prolongement des deux pics de bruits impulsionnels à la figure 16, par exemple), le filtrage aurait tout avantage à être effectué dans l'espace polaire naturel du

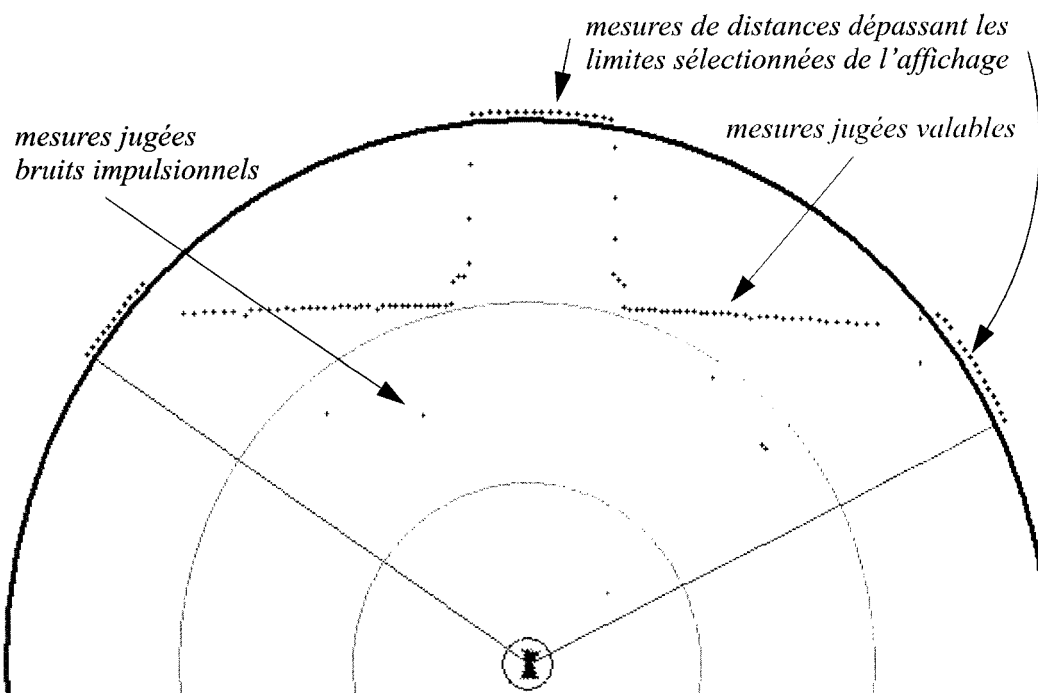


Figure 17 : Différence de la couleur des points lors de la présence de bruit impulsifonnels dans un scan

sonar. Par souci de simplicité d'affichage, ces courbes polaires seront présentées de façon cartésienne en utilisant le numéro de rayon comme abscisse et cette représentation sera nommée « faux polaire » dans ce document.

Nous allons maintenant voir ce qu'il est possible de faire pour réaliser ces deux objectifs, par filtrage des scans et mise en relation temporelle, et ce, pour les deux types de bruits.

Les profils utilisés pour la validation des différents filtres ont été simulés grâce à la modélisation de l'entrée d'eau de l'évacuateur du barrage LG2A. Les paramètres de bruits étaient :

- a. bruit impulsifonnels: $f = (0.0667d + 0) \%$;
- b. bruit gaussien : $f = (1d + 0) m$.

où d représente la distance de l'objet au sonar et f le facteur résultant. Notez que pour le bruit gaussien, ce facteur représente des **centièmes** de l'écart-type.

Un scan idéal a été généré ainsi que plusieurs profils contenant plus ou moins de bruit, à différentes distances de la surface du barrage, afin de constituer une base de profils qui servira à la validation du filtrage de surface à la fin du chapitre. D'ici là, un de ces profils a été choisi pour l'illustration des différents filtres considérés.

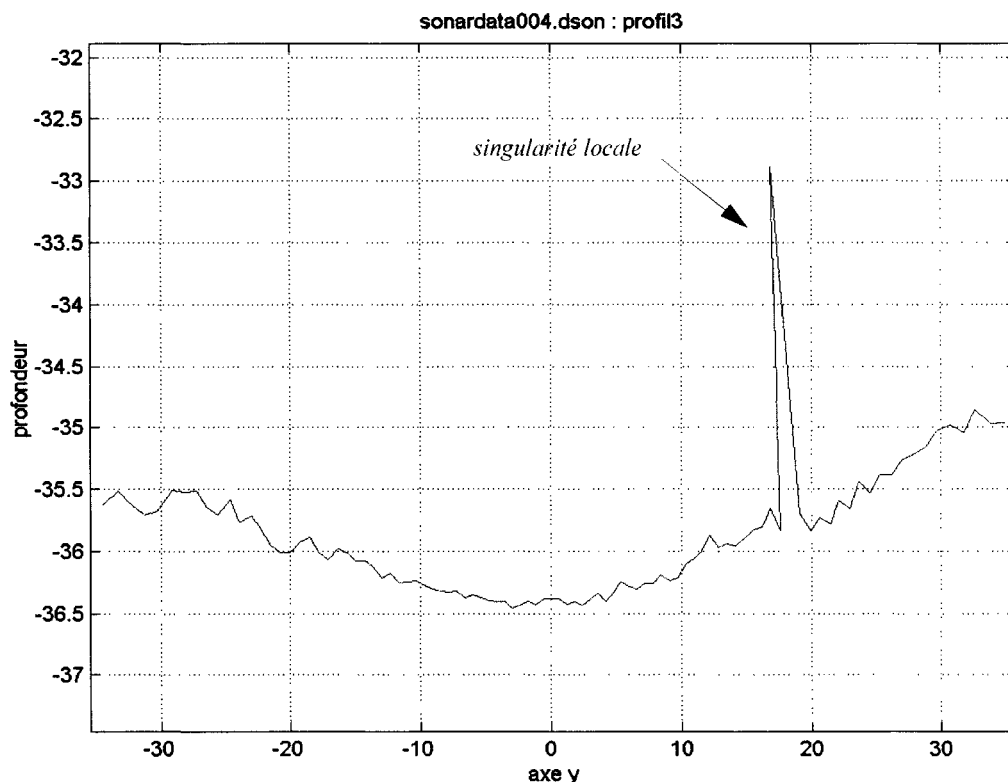
Il est clair que ces données étant générées par simulation, nous avons les facteurs de bruits utilisés à notre disposition pour choisir les paramètres de filtrage en conséquence. Dans la réalité, cette information n'est évidemment pas disponible et doit être estimée. Une telle procédure d'estimation des conditions acoustiques d'un site est proposée au chapitre 5.

4.1 Filtrage du bruit impulsionnel

En examinant un profil de données réelles (voir graphique 6), on peut constater que bien souvent, les mesures impulsionnelles indésirables ne possèdent effectivement pas de voisins immédiats dans les rayons adjacents. Il s'agit de singularités locales de réflexion dues à des particules en suspension sur le chemin des rayons.

L'intérêt de cette étape de filtrage serait de faire disparaître ces parasites, tout en modifiant minimalement les autres points du profil afin de fournir au filtrage du bruit de surface les informations les plus fidèles aux originales possibles.

La littérature mentionne plusieurs stratégies pour réduire ces signaux parasites (« speckles » ou « outliers ») et il est possible de les séparer en deux catégories : la reconstruction des données « idéales » et le filtrage numérique des données brutes.



Graphique 6 : Exemple d'un scan réel du fond d'un étang en représentation « faux polaire »

La première des deux catégories n'est en fait pas utilisable dans le cas présent, puisqu'elle nécessite les informations complètes des amplitudes temporelles de chacun des 80 capteurs.

Par contre, elle vaut quand même la peine d'être résumée ici, afin d'acquérir une meilleure vue d'ensemble des outils existants.

Selon Murino [15] l'algorithme par « niveaux de confiance » est une méthode qui a fait son apparition il y a une dizaine d'années et qui tente de faire concorder un signal idéal et celui obtenu. L'idée est que la plupart des phénomènes acoustiques qui vont altérer l'onde sonore émise ne feront que la déformer, mais pas la modifier. En effet, un étirement spatial ou temporel du front d'onde ne fera qu'allonger la cloche gaussienne, mais ne fera pas disparaître

son amplitude maximale. Donc, en calculant une forme d'onde réfléchie théorique, « au meilleur de notre connaissance des caractéristiques de l'environnement » en fonction de la distance à chaque instant, il est possible de calculer un niveau de confiance de la qualité du signal reçu basé sur son amplitude et sa forme. Cette méthode semble très efficace pour réduire l'imprécision des mesures de distance et des halos autour des objets causés par les lobes secondaires.

En continuité de ses recherches, le même auteur (Murino [16], [17]) a perfectionné cette méthode de niveaux de confiance en introduisant une reconstruction conjointe des distances mesurées et de leur facteur de confiance. Le processus codifie en champs de Markov aléatoires (« Markov Random Fields ») des images 2D de scans consécutifs (« range map ») et de leurs facteurs (« confidence map ») afin de pouvoir nettoyer les deux de façon concurrente et itérative, jusqu'à obtenir une sorte de carte de taux de confiance pratiquement binaire et des valeurs de distance démontrant un minimum de bruit et d'erreur de mesure.

La seconde catégorie s'inspire pour sa part du domaine du traitement numérique d'image dans son utilisation de divers filtres, basés principalement sur la classification statistique, appliqués aux données d'un scan individuel. Voici quelques-uns des filtres les plus utilisés :

Le filtre le plus utilisé est le filtre médian 1D (Mann [18], Evans [19], Bisquay [20] et Hoppe [39]). Il est universellement reconnu pour son efficacité à éliminer les bruits impulsionnels et à respecter la position des frontières entre les régions. En fait, malgré qu'il existe d'autres filtres plus complexes et peut-être plus performants, ses résultats très corrects, sa simplicité d'implantation et ses besoins assez modestes en calculs justifient qu'il soit habituellement le premier filtre considéré.

Description du filtre médian 1D : ce filtre parcourt les éléments d'une courbe en ordonnant les « n » voisins de chaque côté de la position courante et propose à chaque fois la valeur médiane de ce groupe de $n \times 2 + 1$ éléments en remplacement de la valeur originale.

Un système d'équation différentielle partielle (EDP) peut être employé pour modéliser le filtrage désiré en utilisant la théorie de la diffusion anisotrope (Acton [21], [22]) où chaque itération tente de réduire les écarts entre le point courant et ses voisins, ce qui réduit les oscillations. Selon l'auteur, les résultats obtenus sont très comparables à ceux du filtre médian, grâce à un algorithme plus efficace en nombre d'opérations. Par contre, de très nombreuses itérations doivent être effectuées afin d'arriver à ce résultat, puisque le filtre doit aplanir, petit à petit, de grands pics. Il est donc intéressant lorsque de nombreuses passes du filtre médian sont aussi nécessaires afin d'uniformiser le signal, mais pas dans notre cas, puisqu'une seule itération suffit à identifier les bruits impulsionnels.

Les filtres médians avec poids (Evans [24], Morales [25] et Bangham [26]), de Lee, de Kuan ou de Frost (Zaman [27] et Acton [28]) sont différentes versions d'un concept de filtrage adaptatif qui essayent de balancer linéairement les proportions entre la valeur originale et la moyenne du voisinage. L'idée est que dans une région de faible variance, un moyennage important diminue la présence de bruits impulsionnels et que dans une région de forte variance, aux abords d'une frontière par exemple, il faut préserver les discontinuités en donnant priorité aux valeurs originales. Ce type de filtrage est très efficace dans une situation de bruit multiplicatif (où l'amplitude du bruit augmente avec l'amplitude du signal), mais moins dans notre situation où le bruit impulsif est additif. Ces filtres utilisent également beaucoup plus de calculs pour obtenir la moyenne locale et effectuer la combinaison linéaire des deux informations.

Tous les filtres présentés jusqu'à maintenant pourraient être qualifiés de « filtrage spatial » au sens où ils n'impliquent pas de relation entre les scans consécutifs. Afin d'améliorer la capacité de détection des indésirables, il est possible de tirer partie de la forte cohérence entre eux. Une autre méthode consiste en un filtrage « temporel » qui effectue un moyennage des rayons correspondants de plusieurs scans successifs, (Okino [29]). Cela permet d'augmenter le ratio signal/bruit, et donc de réduire mais sans complètement faire disparaître, l'importance des données erronées ou dispersées autour des distances réelles. La

méthode permet également de combler celles manquantes (trous par réflexion dans une direction autre que le récepteur par exemple). Cette approche est désavantagée, par contre, lorsque l'on augmente le nombre des scans considérés et que le véhicule est en mouvement (Okino utilisait des compensations électromécaniques et sonar afin d'assurer la stabilité d'orientation du système sur le bateau) : le léger décalage des données 3D des scans successifs dû à l'imprécision du système de positionnement et aux déplacements du sonar. Ce déplacement entraîne l'exagération du flou des données (« ghosting effect »), puisque les prises de mesures précédentes n'ont pas rencontré exactement la même surface que l'actuelle. Cet effet est néfaste pour la qualité des données obtenues, à moins de prévoir un recalage 3D des données référencées de façon à minimiser la différence de position du sonar entre chaque scan. Ce moyennage par scans consécutifs est d'autant plus complexe dans notre cas à cause des oscillations d'assiette du sous-marin (voir chapitre 7.1.1.1) : les points d'un scan précédent peuvent très bien ne pas être réellement des voisins immédiats une fois référencés.

Bernardini [30] propose une approche très différente pour éliminer les indésirables a posteriori : plutôt que de se perdre en algorithmes de conditionnement des données de plus en plus complexes en tentant de prévoir tous les cas géométriques, il est possible de mettre à profit l'indice de complexité $C = \text{Aire}/\text{Périmètre}^2$ et permettre une élimination des triangles anormaux selon que leur élongation dépasse un seuil désiré. La seule limitation de cette approche est que tous les triangles longs seront éliminés sans distinction. Dans notre situation, certains de ceux issus de points marqués bruits impulsionnels pourraient être des voisins transversaux d'un objet mince, par exemple un tronc d'arbre ou la tige d'une grille, et ces triangles ne devraient pas être détruits, mais plutôt étiquetés comme des « discontinuités ». On pourra donc limiter cette vérification des triangles « longs » à ceux dont un des vertex a été classé comme indésirable, mais qui ne possède pas de voisin du même type. Du fait de sa nature plus géométrique que numérique, la discussion de l'utilisation de ce critère sera présentée au chapitre 7.

Il est clair que, grâce à son efficacité et à sa rapidité de calcul, le filtre médian demeure un bon candidat pour le filtrage des bruits impulsionnels du poste de commande. En ce qui concerne la taille du voisinage à utiliser, on peut facilement démontrer qu'un filtre médian de taille 3 permet d'éliminer des imperfections d'une largeur de un rayon $((n-1)/2)$, qu'un filtre de taille 5 s'occupe d'éléments de deux rayons de large, etc. A priori on pourrait donc penser qu'un filtre de taille 3 soit suffisant, mais il a été constaté, lors de tests en bassin, qu'à certaines occasions des bruits de 2 rayons de large apparaissent. Était-ce un objet en suspension plus large ou du bruit? Difficile à dire pour l'instant, mais inutile de compliquer l'algorithme pour le poste de commande, puisque le pilote est en mesure de repérer d'aussi subtils détails. D'un autre côté, le processus de reconstruction se doit de faire cette différence s'il ne veut pas déformer la géométrie obtenue par de fausses informations. Nous verrons qu'il est possible de combiner certains critères de filtrage et de reconstruction, dont la cohérence temporelle des données (qui revient à un voisinage transversal une fois la connectivité établie), afin de valider ces données ambiguës.

Modifications au médian classique

Il est important maintenant de ne pas perdre de vue l'utilisation concrète de ce filtre pour la détection des mesures plus courtes que celles de la surface balayée. Une série de modifications à son fonctionnement s'impose pour obtenir le « médian tronqué » :

1. La valeur médiane de remplacement ne doit pas être utilisée si elle implique un raccourcissement brusque de la distance dans la représentation en faux polaire (voir figure 19 et graphique 7). En effet, une distance brute plus longue n'indique pas une particule qui intercepterait plus loin le rayon, mais plutôt une profondeur, un trou, dans la surface principale.
2. Puisqu'un bruit de surface peut provoquer des distances voisines variant légèrement, il ne faut pas que le filtrage impulsionnel élimine cette variabilité qui sera filtrée plus tard. Un seuil de « différence minimale » augmentant linéairement avec la dis-

tance est utilisé et pourrait être sélectionné de façon à dépasser l'écart à la surface équivalente à deux écarts type (95%) de la distribution normale créée par la variance estimée du bruit de surface (voir chapitre 5.1.3). Dans ce travail, un seuil représentant le double de trois écarts type est utilisé (voir figure 18).

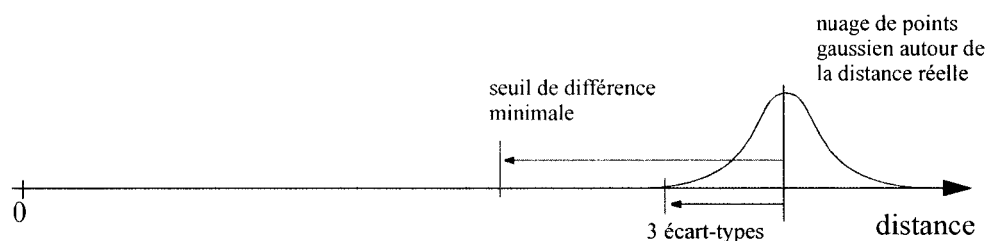


Figure 18 : Représentation graphique du choix de facteur de « différence minimale »

3. Le filtre médian original remplace la valeur courante par une autre existante qui est centrale dans l'intervalle en cours, sans se soucier de savoir si celle-ci appartient à l'un ou l'autre de ses voisins immédiats, ce qui peut être problématique pour une taille de voisinage plus grande que 3. Nous devrions plutôt nous contenter de l'étiqueter « ne pas utiliser » et laisser la chance au filtrage du bruit de surface de combler l'espace par une valeur plus appropriée, intermédiaire de ses voisins.
4. Puisque le filtre médian est basé sur le voisinage immédiat d'une donnée, il ne peut s'occuper des $(n-1)/2$ positions aux extrémités du profil. La méthode d'extension des bordures qui sera utilisée pour le filtrage de surfaces n'est pas utile ici, puisque ces valeurs recopiées viendront créer une majorité artificielle qui rendra inutilisable la classification médiane. Il a été jugé plus simple et efficace d'écraser directement ces données intouchées par leur première voisine filtrée. Ainsi un bruit impulsionnel en première position disparaîtra sans causer trop de dégât.

Le graphique 8 est une comparaison des résultats obtenus par filtrage à l'aide du médian classique (taille de voisinage 3) et du « médian tronqué » (tailles 3 et 5). Nous pouvons constater que le médian tronqué respecte au mieux les données du profil qui ne sont pas considérées du bruit impulsionnel.

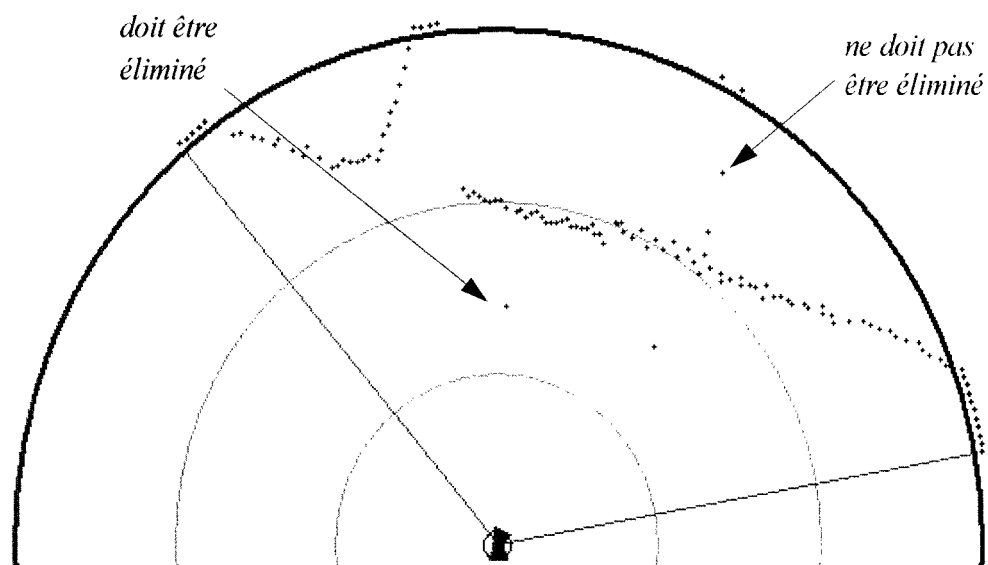
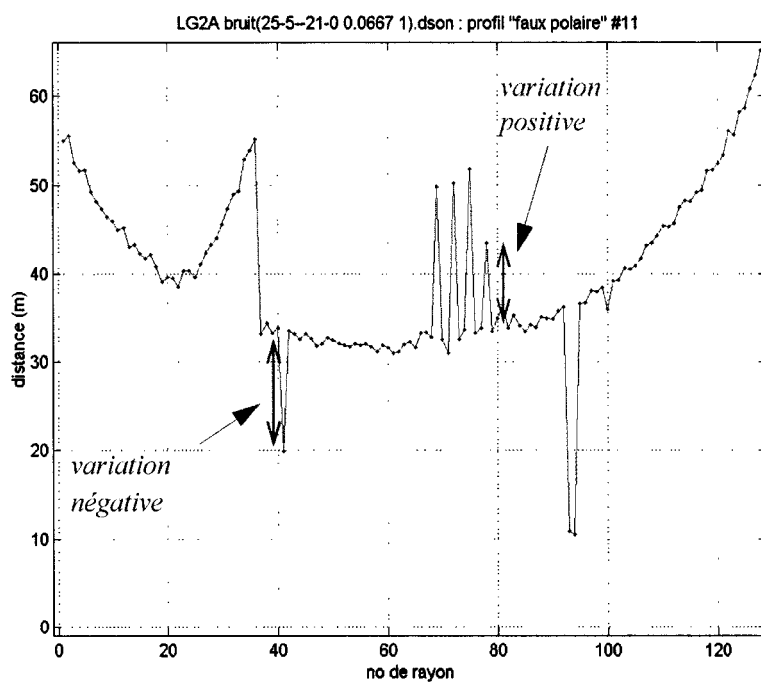
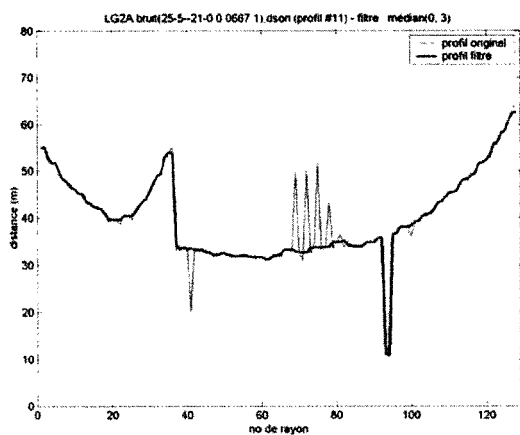


Figure 19 : Différence entre le bruit impulsionnel et une discontinuité positive de profondeur dans un scan sonar

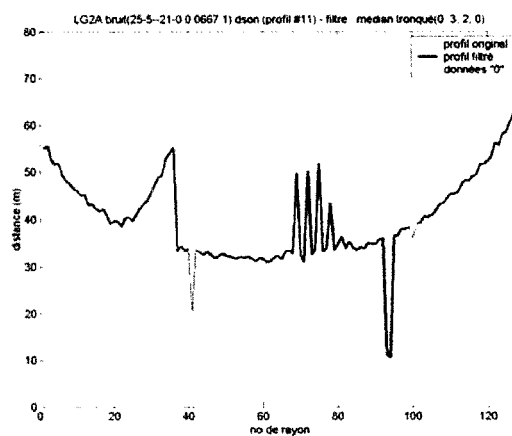


Graphique 7 : Différence entre le bruit impulsionnel et une discontinuité positive de profondeur

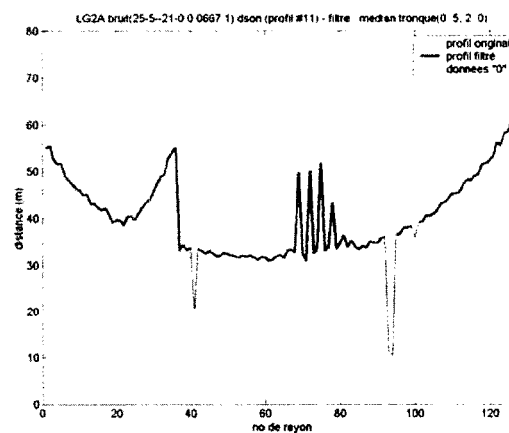


médian classique
(voisinage 3)

médian tronqué
(voisinage 3)



médian tronqué
(voisinage 5)



Graphique 8 : Comparaison des résultats de filtrage par les médians classique et « tronqué », avec un voisinage de tailles 3 et 5

4.2 Filtrage du bruit de surface

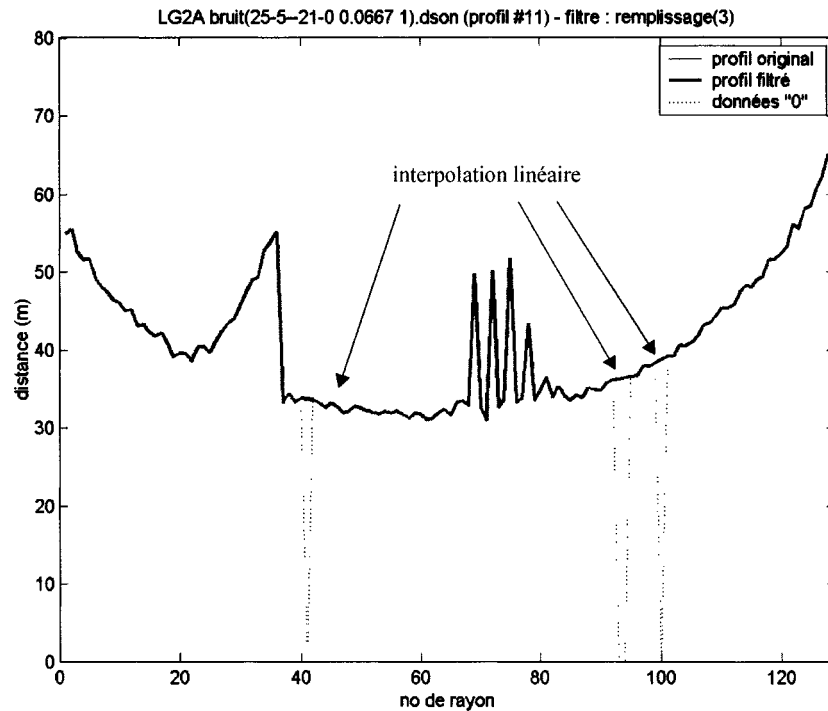
Maintenant que les données du balayage ont été nettoyées de valeurs qui ne faisaient pas partie des surfaces du barrage, nous pouvons passer à la mise en forme des données réellement utiles. Nous avons défini le bruit de surface comme de micro-changements locaux de vitesse de propagation qui viennent rendre légèrement différentes les distances voisines mesurées, même si elles appartiennent à la même surface plane.

Remplissage des données manquantes

La technique de filtrage choisie doit être capable de combler les trous de 1 à 2 rayons de large laissés par le filtrage impulsif, ou provenant carrément de données manquantes (quand celles-ci ne s'étendent pas sur une section trop large). Certaines des méthodes évaluées plus loin sont intéressantes pour leurs résultats de filtrage, mais ne peuvent prendre en compte des informations manquantes. Il faut alors, si on veut quand même les utiliser, effectuer un remplissage manuel du profil. Une interpolation linéaire à partir des valeurs de chaque côté de la section manquante est utilisée pour proposer des valeurs de rechange, quand la largeur de cette section ne dépasse pas un paramètre fixé en fonction du filtre utilisé et de la taille de voisinage désiré (graphique 9).

Effet de bord

Tout filtrage par convolution implique la question du traitement des extrémités du lot de données. Puisque la matrice utilisée pour le calcul possède une taille minimale de 3, une convolution standard laissera intacte les $(n-1)/2$ informations de chaque côté. Pour certains filtres, ces données laissées telles quelles ne sont pas d'une grande influence, mais pour d'autres, elles signifient un éloignement du prolongement de la courbe lissée aux extrémités. C'est pourquoi un certain nombre de données dupliquées sont ajoutés de chaque côté au besoin.



Graphique 9 : Remplissage par interpolation linéaire d'un profil contenant des « données 0 »

Méthodes investiguées

Puisque les différences de vitesses accumulées le long des trajectoires sont aléatoires, nous pouvons comparer ce type de variation à un bruit gaussien de distance. Il est donc possible de représenter mathématiquement la déformation des informations idéales par l'équation suivante :

$$S(x) = F(x) + F(x) \cdot N(x) =$$

$$F(x) \cdot (1 + N(x)) = F(x) \cdot G(1, \sigma) \quad (4.7)$$

où

$S(x)$: les mesures sonar réelles

$F(x)$: représente les données non-bruitées

$N(x)$: la fonction de bruitage générale

$G(1, \sigma)$: la fonction de bruitage gaussienne utilisée

$N(x)$ peut alors être modélisée par une distribution normale de rencontrer de telles mesures raccourcies ou allongées. Soit en supposant que la moyenne de cette distribution gaussienne est 0 et d'écart type plus ou moins grand, mais constant, selon l'homogénéité des conditions de propagation (voir chapitre 5.1.3), comme dans la partie gauche de l'égalité, ou en supposant une probabilité gaussienne de moyenne 1, comme dans la partie de droite.

Nous allons maintenant passer en revue certaines méthodes de filtrage permettant d'augmenter l'importance des véritables données présentes dans le profil, après l'addition d'un bruit de type gaussien multiplicatif. Il s'agit essentiellement de techniques basées sur les filtres de convolution et qui utilisent donc, pour la plupart, le remplissage de largeur égale à la taille de leur matrice de convolution :

- a. La plus simple des méthodes est en fait l'opposée directe de celle utilisée pour introduire le bruit de surface dans le simulateur de sonar. Il s'agit de filtrer les scans à l'aide d'un filtre passe-bas gaussien 1D de moyenne 1 et dont la variance augmente linéairement avec la distance. Ce filtre est simple à réaliser à l'aide d'une matrice de convolution, surtout en 1D, et relativement efficace en temps de calcul.

$$\text{filtre gaussien 1D : } G(x, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{(-x^2/2\sigma^2)}$$

Pour obtenir la matrice de convolution, nous devons calculer la valeur de la fonction $G(x)$ à intervalles régulier. Il est courant de remplir cette matrice jusqu'à obtenir des coefficients qui ne dépassent pas un certain pourcentage de l'amplitude maximale. Ce seuil est généralement 0,1%. Voici une matrice de convolution gaussienne d'écart type $\sigma = 1$, et de taille correspondante 7 :

$$G(x, 1) = [0,0044 \ 0,0540 \ 0,2420 \ 0,3989 \ 0,2420 \ 0,0540 \ 0,0044]$$

Par contre, sa simplicité cache deux défauts majeurs :

1. la difficulté à estimer la « distance moyenne » d'un voisinage, pour en déduire la variance à utiliser;
2. un effet d'aplanissement et de déplacement des bordures entre les régions utiles, ce qui est un problème non-négligeable dans une situation de manipulation des formes.

Il serait préférable de pouvoir faire varier la « force de filtrage » en fonction de la forme des profils, plutôt qu'en fonction de leur éloignement général du sonar. Adapter l'écart type du filtre à l'inverse de la variance locale, qui est en théorie une indication indirecte de la distance, permettrait de réduire celui-ci aux abords des discontinuités et de laisser libre cours à l'aplanissement des formes en région de faible variance. Plusieurs règles heuristiques d'adaptation ont été proposées dans la littérature afin de répondre à différents domaines d'application :

1. Hodson [31] a décomposé le filtre gaussien 1D sous forme de série (reproduit ici en

omettant les termes de plus grand ordre) : $F_G(x) = F(x) + \frac{\tilde{F}(x)}{2}\sigma^2$. En solution-

nant pour la variance nous obtenons donc $\sigma^2 = \frac{2\epsilon}{|\tilde{F}_x|}$. Cette règle offre la possibi-

lité de définir une borne supérieure d'erreur au filtrage (ϵ), mais demande le calcul d'une dérivée seconde très instable.

2. La règle de l'adaptation par dépendance à l'intensité (« Intensity-dependent

spread ») de Cornsweet [32] $\sigma = \frac{1}{F(x)}$ et l'adaptation par dépendance au con-

traste (« Contrast-dependant spread ») $\sigma = \frac{\sqrt{2}C}{\sqrt{2+C}}$ (avec $C = \frac{F(x) - F_a(x)}{\max(F, F_a)}$ et

F_a comme la valeur moyenne locale de l'intensité) de Vaezi [33] sont conçues pour imiter différents aspects du fonctionnement du système visuel humain.

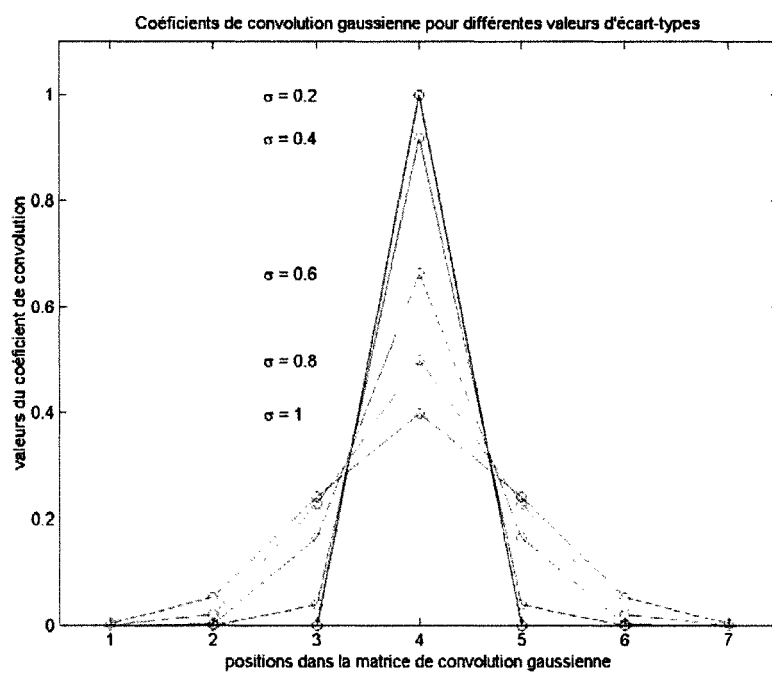
3. La règle de Deng [34] : $\sigma^2 = e^{\left(-\frac{G^2(x)}{K}\right)}$ ($G(x)$ étant le gradient) est plus simple et d'application général. Elle permet d'imposer une limite maximale de 1 à la variance, grâce à l'exposant toujours négatif du nombre d'Euler, et d'indiquer la rapidité avec laquelle celle-ci diminue en présence de discontinuités à l'aide du facteur K : un fort K réduit à néant un gradient déjà faible et garde l'exposant proche de 0.

Le graphique 10 présente les matrices obtenues pour différentes valeurs d'écart-type situés dans l'intervalle $[0, 1]$.

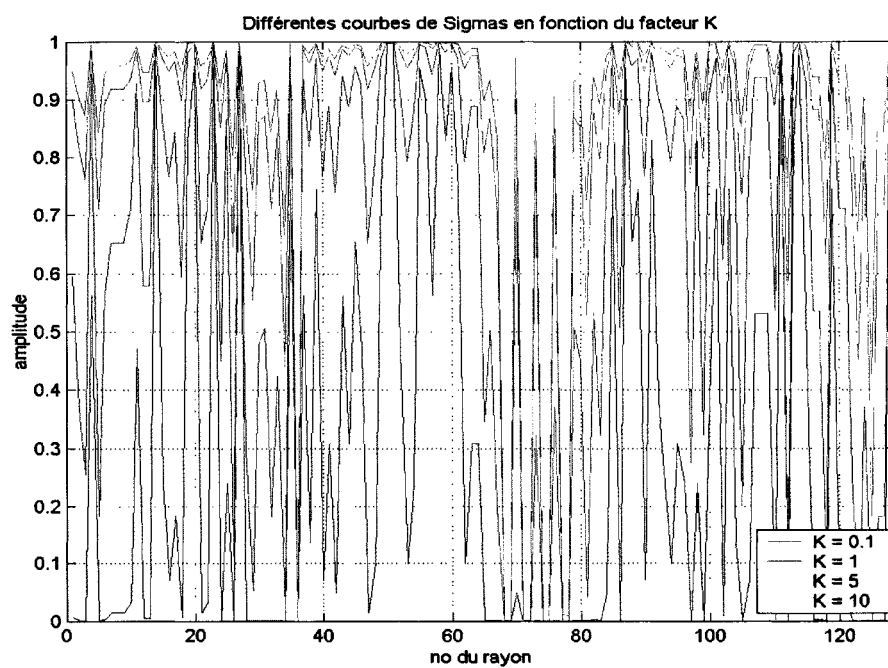
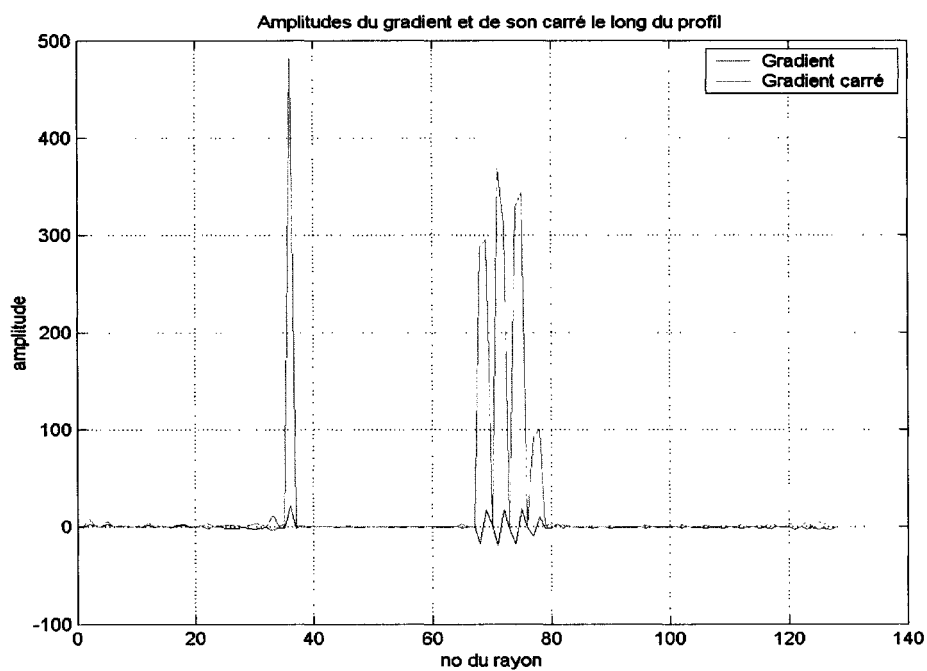
Le graphique 11 montre l'effet du gradient sur l'adaptation de la variance locale. Nous pouvons constater qu'un facteur K plus élevé force la variance à rester proche de la valeur maximale lorsqu'il n'y a pas de discontinuité à proximité et est tout à faire désirable.

Le graphique 12 montre le résultat de filtrage pour les deux facteurs de K opposés : de 0,1 et 10. Le bruit de surface est réduit plus efficacement à l'aide du facteur plus élevé et semble être la direction à prendre pour choisir la valeur finale du paramètre. D'un autre côté, ce lissage intense est néfaste pour les données voisines de lieux de discontinuités. Également, les coins dans la forme de la surface se font excessivement arrondir, jusqu'à être méconnaissables.

Il serait utile de pouvoir comparer les résultats obtenus de façon plus formelle que par simple inspection visuelle. Nous allons voir plus loin comment le faire, mais également que ce « critère de performance de restitution de la surface idéale » n'est pas encore capable, dans l'état actuel du filtre, de mesurer son rendement correctement.

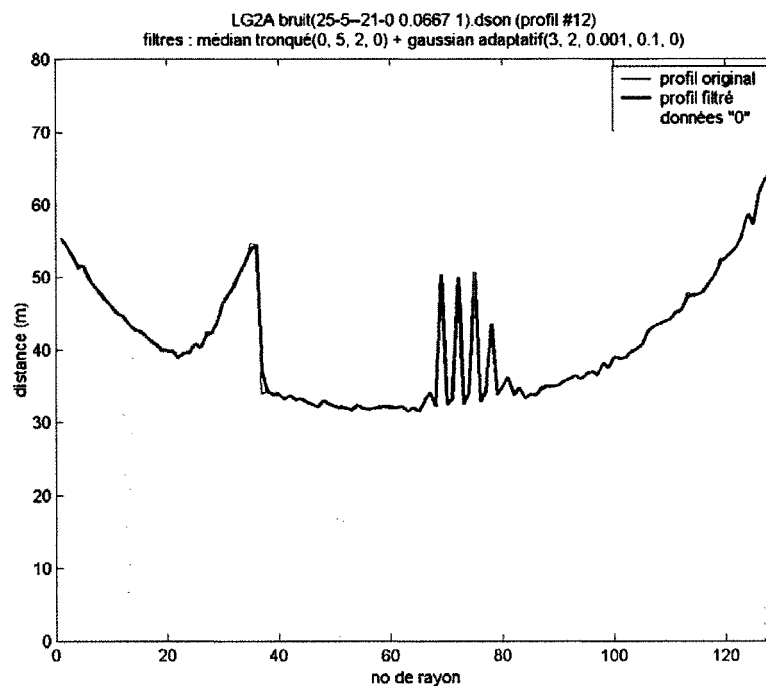


Graphique 10 : Coéfficients des matrices de convolution gaussiennes pour divers écart-types

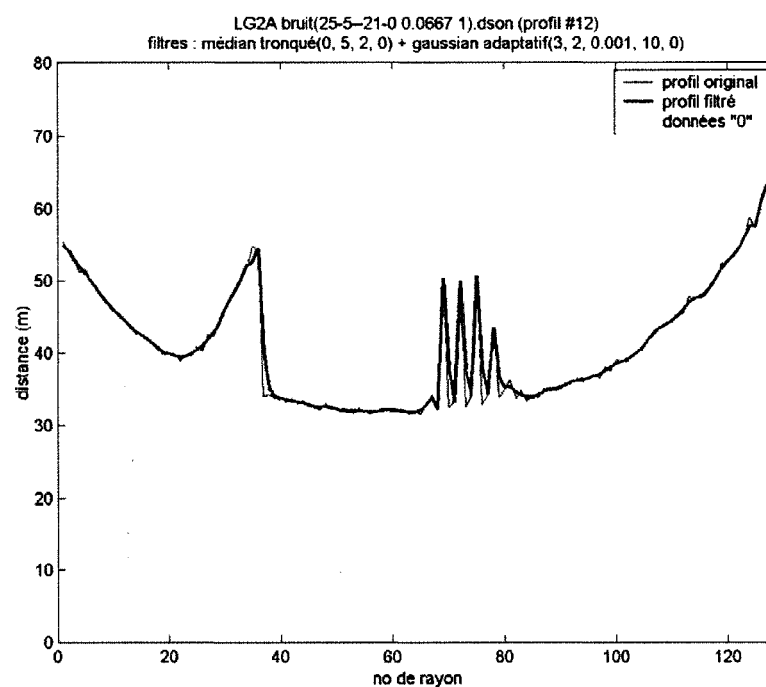


Graphique 11 : Gradient du profil et adaptation de la variance pour différents facteurs K

K=0,1



K=10



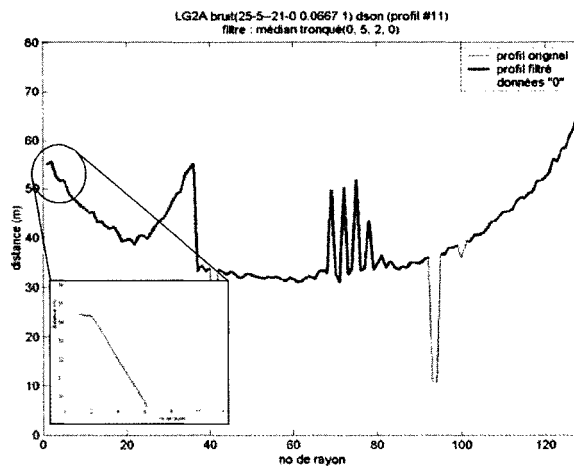
Graphique 12 : Résultats de filtrage à l'aide de deux facteurs K particuliers

- b. Wiener : Comme expliqué par Lim [35], le filtre Wiener est un filtre passe bas qui a été construit en minimisant l'erreur carrée moyenne entre les données originales et celles filtrées.

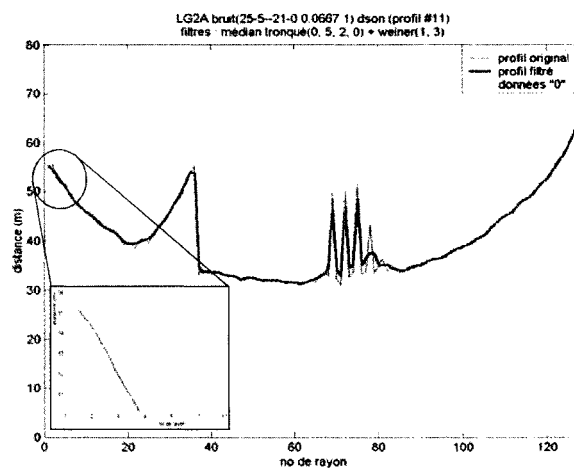
Le graphique 13 montre le filtre appliqué avec un voisinage de 3 et une largeur de bordure respective de 0 (aucune), 1 et 2. On voit clairement que d'ajouter une bordure de chaque côté du profil améliore le comportement du filtre aux abords des extrémités, mais que d'en ajouter sur une largeur plus grande que $(n-1)/2$, n étant la taille du voisinage, ne donne rien de plus.

Le graphique 14 montre trois résultats de filtrage par la méthode de Weiner à l'aide de différentes tailles de voisinages : respectivement 3, 5 et 7 de large. L'augmentation du lissage est très évidente. Par contre, ce filtre a encore plus de difficulté à respecter les bordures des discontinuités que le filtre gaussien adaptatif.

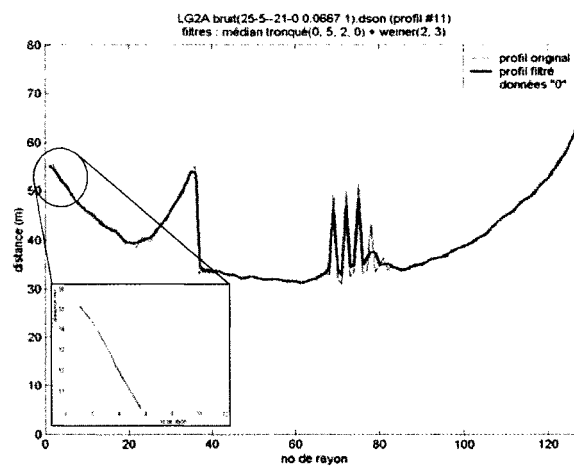
bord = 0
(aucun)



bord = 1

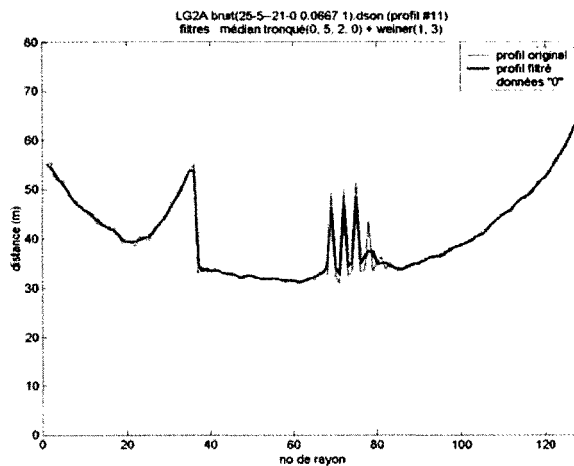


bord = 2

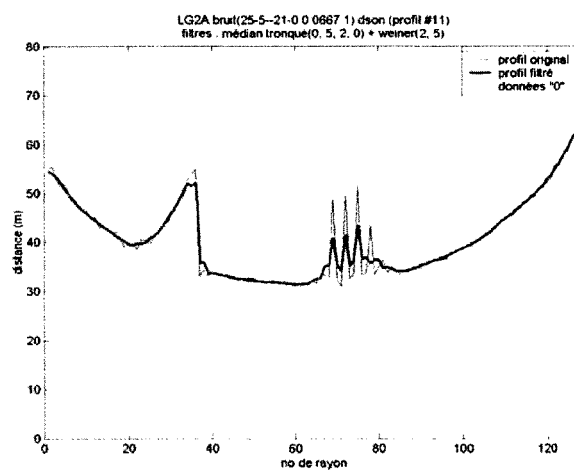


Graphique 13 : Lissage de profil par filtre Wiener de taille 3 et différentes largeur de bordures ajoutées

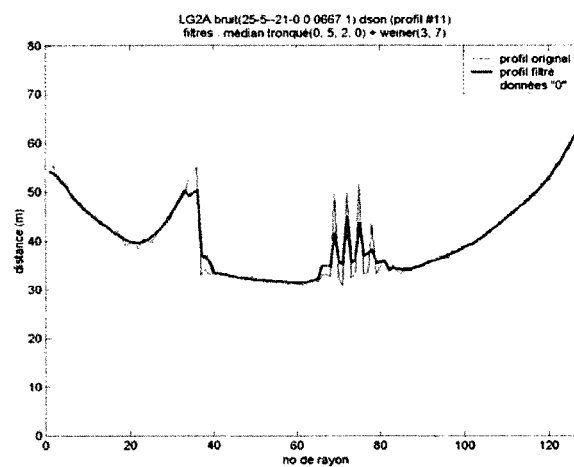
voisinage
3



voisinage
5



voisinage
7



Graphique 14 : Correction d'un profil par filtre Wiener à l'aide de différentes largeurs de voisinage

4.2.1 Segmentation des profils

Jusqu'à maintenant, nous avons tenté de lisser un profil sonar provenant d'une surface de barrage dans lequel se trouvait un bruit de type gaussien additif. Le résultat de chacun des filtres étudiés était adéquat, excepté à proximité de discontinuités. Ce manque était, en fait, assez prévisible, puisque nous considérons ce profil comme continu alors qu'il ne l'était pas vraiment. Comme la reconstruction des données 3D devra de toute façon gérer ces discontinuités à l'aide d'un découpage du profil en segments continus, il serait probablement utile d'en faire profiter cette étape du filtrage également.

Grâce au théorème qui stipule que : si une fonction est continue dans un intervalle elle est aussi dérivable dans cet intervalle, nous pouvons définir certains *niveaux* de continuité :

- a. niveau de continuité 0 : une courbe dont la dérivée n'existe pas en tous points de l'intervalle. Se présente sous forme d'un saut dans la courbe, ou d'un manque (figure 20).

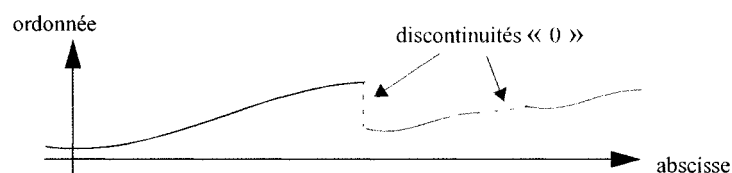


Figure 20 : Représentation graphique de discontinuités de niveau 0

Ce niveau représente les discontinuités typiques observées dans le profil utilisé jusqu'à maintenant.

- b. niveau de continuité 1 : une courbe dont la *première* dérivée existe, mais pas la deuxième. Se présente sous forme d'un changement brusque de pente ou de courbure (figure 21) :

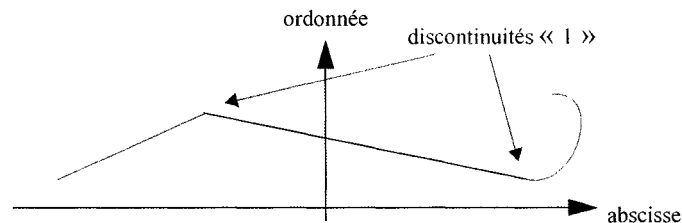


Figure 21 : Représentation graphique de discontinuités de niveau 1

Ce niveau de continuité peut être observé sous forme de coin entre deux surfaces planes contigües, mais d'orientations différentes. Par exemple, l'arête formée par la surface principale et le mur de la cavité (coté gauche du grand « V » inversé dans les profils précédents).

- c. niveau de continuité 2 : une courbe dont les deux premières dérivées existent en tous points de l'intervalle. Toutes les surfaces entre les discontinuités sont des exemples de ce niveau.

4.2.1.1 Détection des discontinuités

La surface d'un barrage présente nécessairement plusieurs cavités, par exemple les entrées des conduits d'amenée d'eau vers les turbines, etc. Dans un scan sonar, lorsqu'une partie de cette cavité est dans le cône de réception des rayons, il se forme une forte discontinuité locale des mesures de distance (voir la présentation visuelle du profil à l'écran du poste de commande à la figure 16 et la localisation des discontinuités à la figure 22).

Nous pouvons voir dans le profil en faux polaires le saut en distance qui semble former la parois de droite de la cavité (ovale rouge). Cette discontinuité de niveau 1 est tout aussi apparente dans le profil cartésien des distances référencées. Cette dernière représentation permettra en plus d'établir un critère de minimum de distance afin d'être déclarée discontinuité : « Tous les auteurs ont assumé jusqu'à maintenant qu'une valeur suffisam-

ment petite de ce paramètre de seuil existe pour permettre de détecter toutes les discontinuités » Hilton [36]⁹, p. 5.

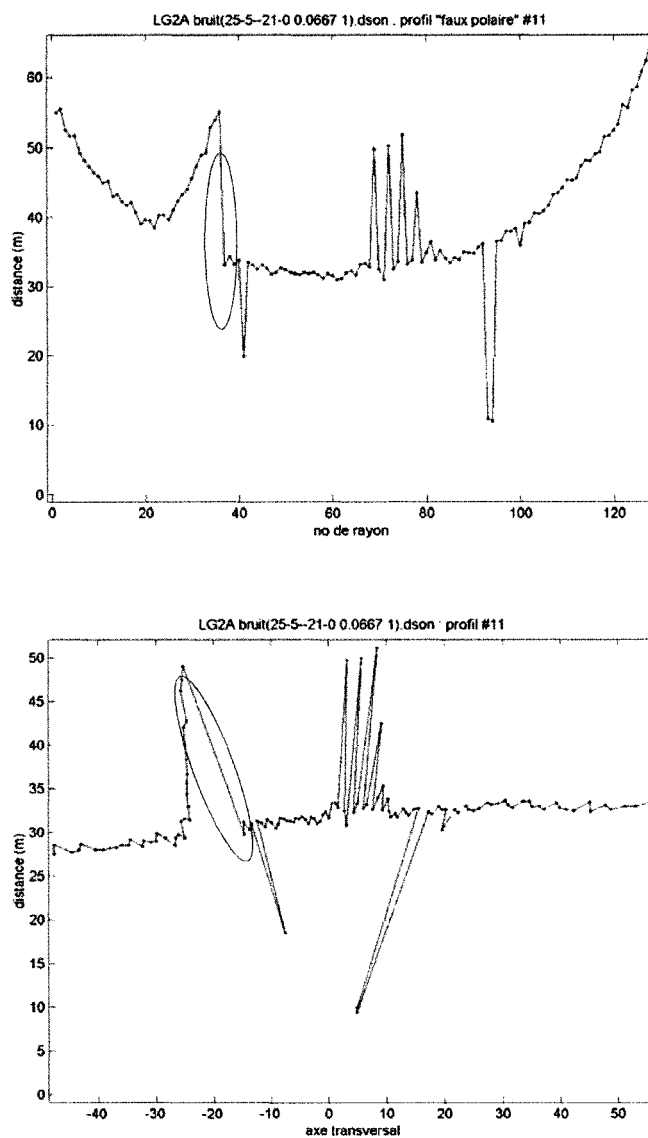


Figure 22 : Scan sonar idéal, profil des distances en « faux pôle » et références 2D

⁹ En anglais dans le texte.

Il est évident qu'il ne faudra pas créer de connectivité entre les points de chaque coté du saut dans la surface finale, puisque ces triangles ne représenteraient pas une surface réelle. D'un autre coté, il serait quand même intéressant de les générer et de les regrouper dans un ensemble de triangles indépendants offrant de façon visuelle la localisation des données locales manquantes.

Les discontinuités de niveau 2 sont beaucoup plus difficiles à identifier, en particulier en présence de bruit. Une procédure itérative largement utilisée par la communauté scientifique consiste à calculer la courbure et la pente en chaque point du profil et de regrouper ceux dont les voisins partagent les mêmes valeurs. La difficulté vient principalement du fait que ces calculs sont très sensibles aux faibles variations introduites par le bruit et rendent presque impossible le choix des seuils de ressemblance suffisantes entre les voisins. La revue de littérature n'a permis de localiser qu'un seul auteur s'étant intéressé particulièrement à la problématique de la segmentation des profils en présence de bruit : Yokoya [37]. Par contre, puisque cette étape de filtrage du bruit de surface peut se passer de cette information pour faire son travail, et que celle de la reconstruction ne l'utilise pas, il a été jugé superflus de s'attaquer à cette difficile question.

Finalement, segmenter un profil consiste à détecter les écarts entre les mesures qui soient plus grands qu'un certain seuil. Mais, tout comme pour la détection du bruit impulsionnel, une seule valeur de seuil ne peut suffire à discerner les discontinuités quand le bruit de surface varie grandement en fonction de la distance. C'est pourquoi il serait plus efficace d'utiliser un facteur de seuil qui permettrait d'adapter celui-ci localement, en se basant sur la plus courte des deux mesures de chaque vérification. On obtiendra ce facteur en ajoutant à un critère fixe, un seuil de 0,5 m est utilisé dans ce travail, une valeur équivalente au double de la largeur complète du nuage de points, 6 écart-types, pour avoir une marge de manoeuvre :

$$f_d = f_{\text{fixe}} + 2 \times 6 \times \frac{f_{\text{surf}}}{100} = f_{\text{fixe}} + \frac{12 \times f_{\text{surf}}}{100} \quad (4.8)$$

où

f_d : facteur de seuil de segmentation en distance

f_{fixe} : facteur de seuil fixe pour la segmentation de données idéales

f_{surf} : facteur d'écart de bruit de surface (voir chapitre 5.1.3) pour compenser l'effet du bruit

La figure 23 montre les différents segments identifiés dans le profil, déjà filtré pour le bruit impulsif et comblé sur une largeur de données manquantes inférieure à 3, à l'aide d'un facteur de seuil de distance minimal de 0,12 m.

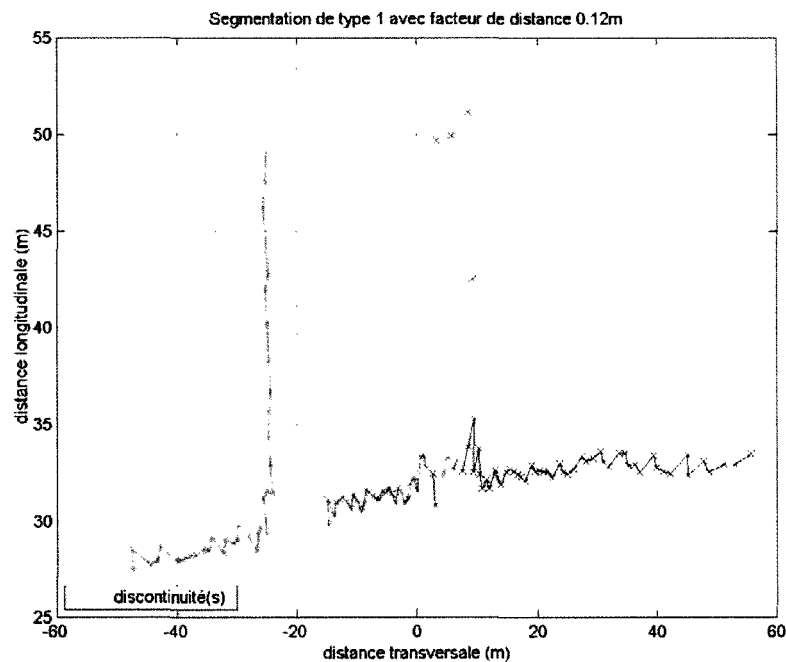


Figure 23 : Représentation multicolore des segments identifiés dans un profil déjà filtré pour éliminer le bruit impulsif

4.2.1.2 Effet de la largeur du cône de réception sur la détection des discontinuités

Lorsque les faisceaux du sonar arrivent en rasant une surface les mesures de distances subissent une élongation naturelle (voir figure 24) de par la perspective du point de vue, ce qui détériore l'efficacité du critère de détection des discontinuités.

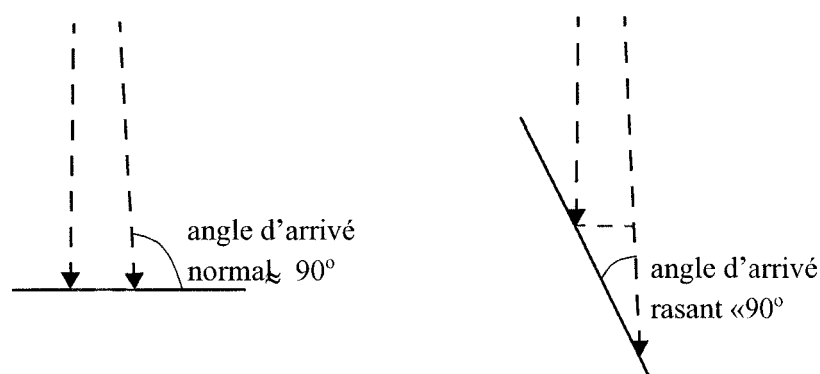


Figure 24 : Élongation longitudinale des mesures par perspective

Cette situation est d'autant plus probable que le sonar nous offre un angle de réception très large et que nous sommes en présence de grandes surfaces planes.

La figure 26 nous montre la mauvaise segmentation obtenue d'un autre profil où le problème est plus évident : particulièrement dans les parois de la cavité en face du sonar.

Pour palier à cet inconvénient, il est nécessaire de généraliser le test de détection des discontinuités : contre-vérifier s'il y aurait une indication qu'en réalité les segments de chaque cotés voudraient se rejoindre (voir figure 27).

Les zones de validité finales de chaque coté de la continuité sont construites à l'aide de rectangles prolongeant les vecteurs de direction. Ces rectangles sont d'une largeur égale au

seuil de distance original et d'une longueur correspondant à un seuil compensant pour la perspective.

Les vecteurs de direction sont calculés à l'aide d'une méthode des moindres carrés linéaire « passant par l'origine » et des deux voisins intérieurs aux points limites.

Le seuil compensateur de perspective (l'hypoténuse du triangle droit) est obtenu en supposant les deux rayons adjacents complètement parallèles, et le coté adjacent de longueur du seuil original (figure 25) :

$$\text{seuil}_{\text{persp}} = \frac{\text{seuil}_{\text{ori}}}{\cos(|\theta - 90|)} \quad (4.9)$$

où :

$\text{seuil}_{\text{persp}}$: seuil de distance locale compensé en perspective

$\text{seuil}_{\text{ori}}$: seuil de distance locale original

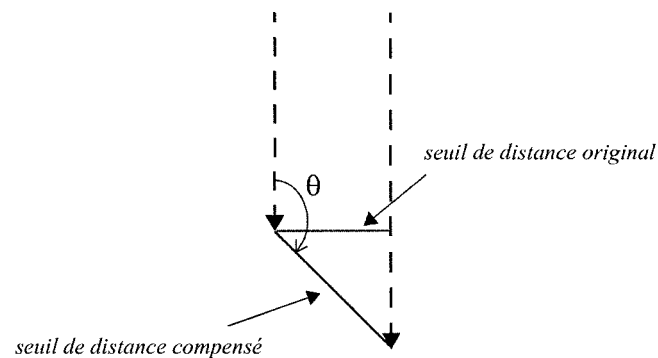


Figure 25 : Triangle de compensation de la perspective

La figure 28 montre le résultat de segmentation avec l'utilisation du test généralisé.

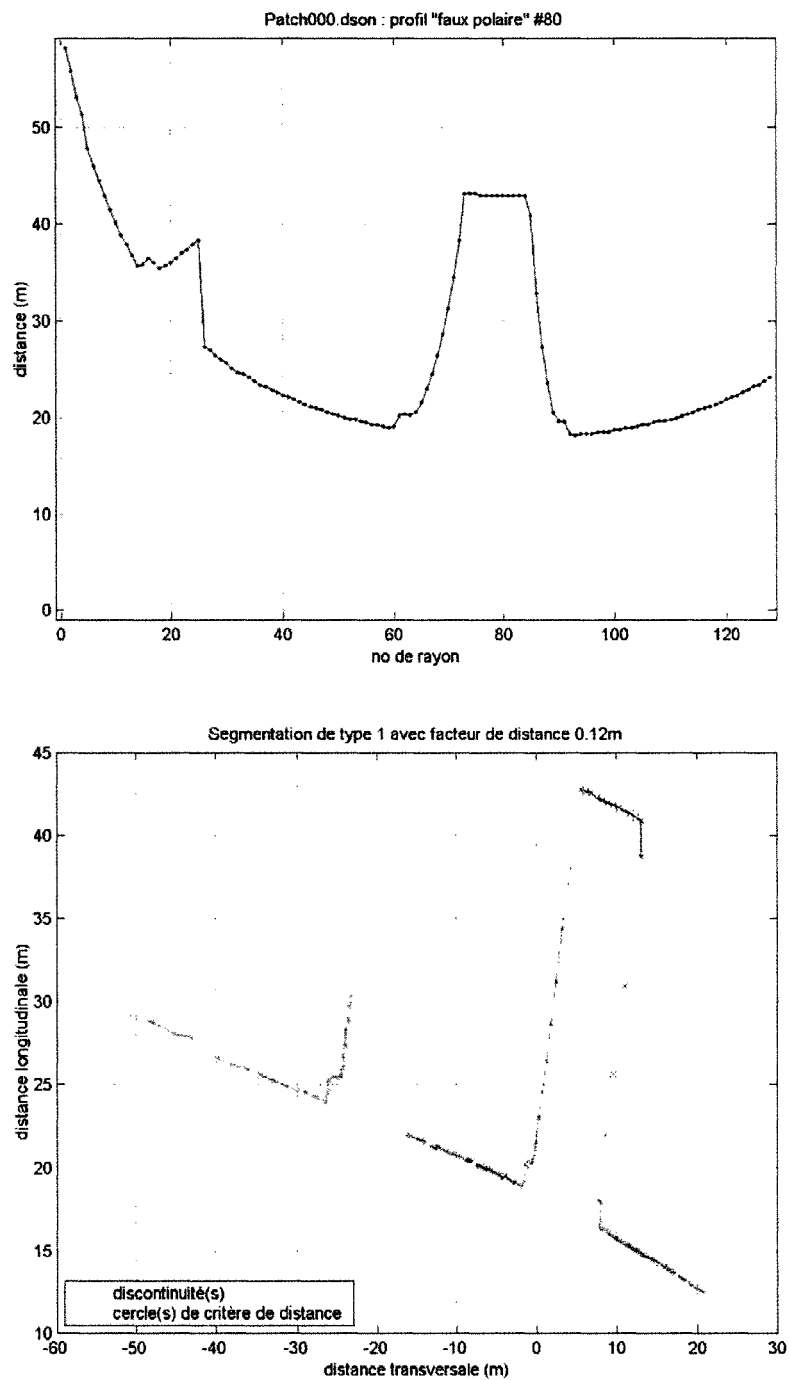
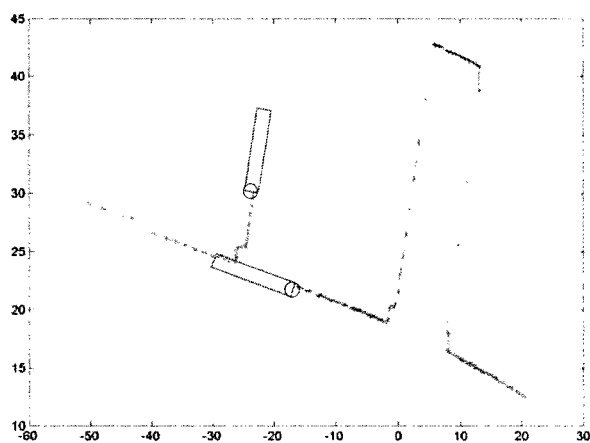
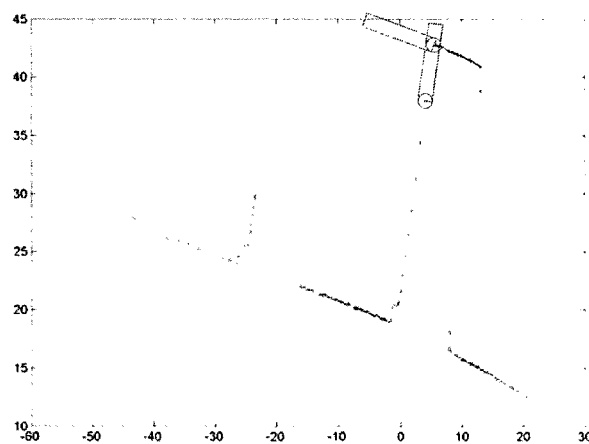


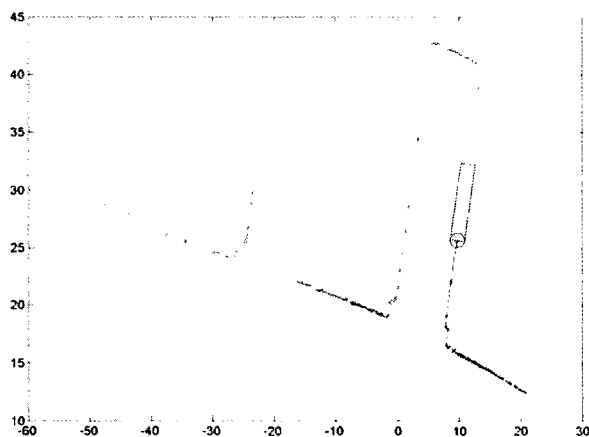
Figure 26 : Profil sonar avec élongation des distances par perspective :
profil en « faux polaire » et segmentation cartésienne
erronée



aucune zone ne rejoint l'autre côté :
validation de la discontinuité



une des zones rejoint l'autre côté :
invalidation de la discontinuité



○ seuil original
▭ zone de contre-validation

Figure 27 : Zones de contre-validation d'une fausse discontinuité
dû à la perspective

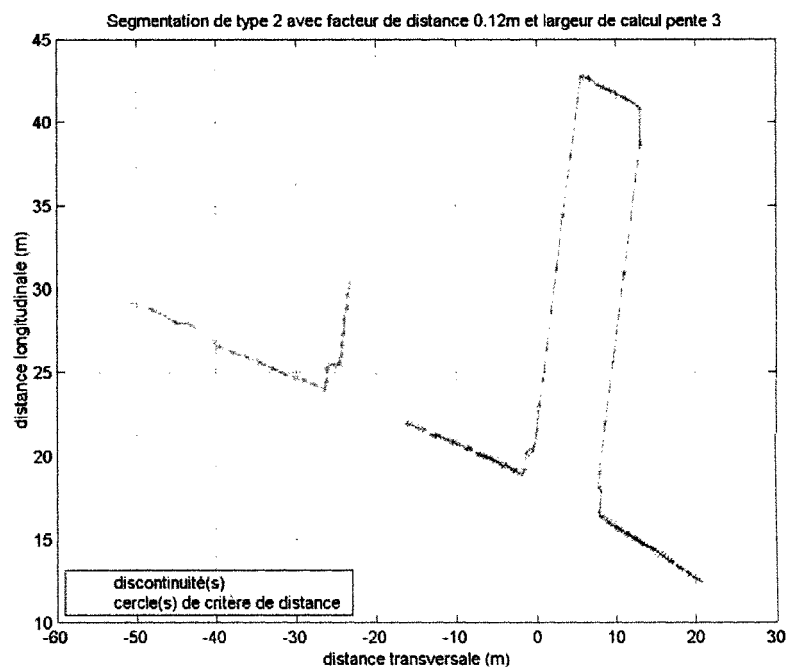
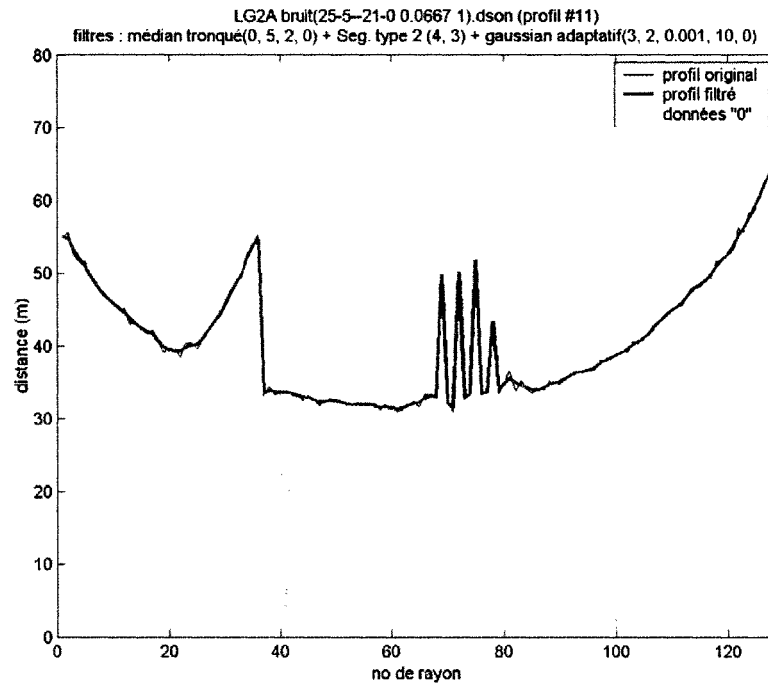


Figure 28 : Segmentation correcte en présence de perspectives par le test de détection généralisé des discontinuités

4.2.2 Comparaison des filtres et présentation globale du processus de filtrage

Maintenant que les filtres n'utilisent que les données de chacun des segments, il est beaucoup plus facile de choisir leurs paramètres puisqu'il n'y a plus de compromis à faire entre la quantité de lissage et la déformation des points en bordure de discontinuités.

Le graphique 15 montre un filtrage par gaussien adaptatif avec un facteur $K=10$ et l'aide de la segmentation. La différence avec le graphique 12 est évidente.



Graphique 15 : Filtrage gaussien adaptatif avec K=10 et segmentation préalable

Il est maintenant possible de formaliser la comparaison entre les différents filtres à l'aide d'un critère de performance de restitution de la surface réelle « idéale ». Le coefficient d'erreur carré moyenne (« mean squared error »), entre le profil idéal et ceux obtenus après filtrage, est un bon choix :

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n} \quad (4.10)$$

où :

y : valeur filtrée

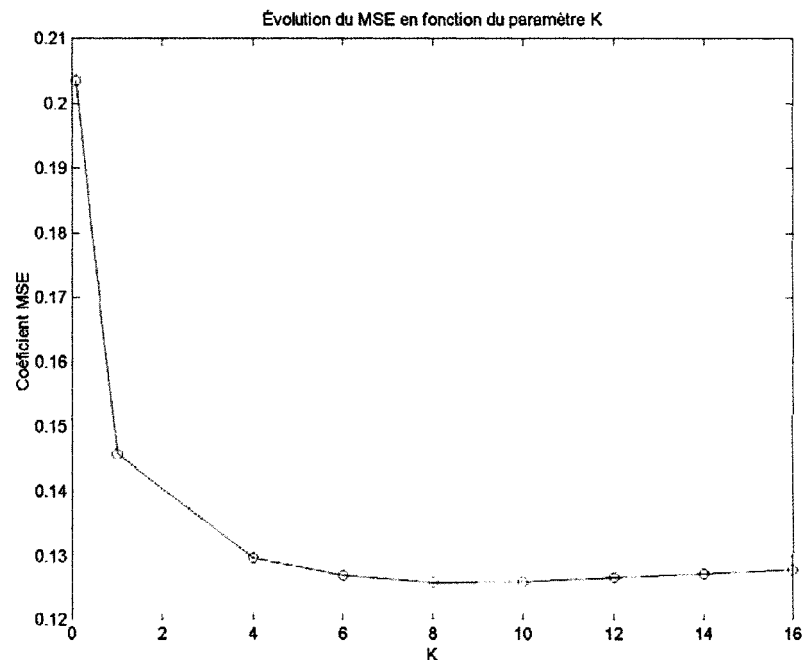
x : valeur idéale

Grace au MSE d'un profil, et en calculant la moyenne de ce coefficient pour plusieurs profils contenant différents niveaux de bruit, il est possible de vérifier de façon non-biaisée l'évolution d'un paramètre du filtre afin d'en choisir une valeur optimale.

Filtre gaussien adaptatif

Le seul paramètre à ajuster pour ce type de filtre est le facteur K . Le graphique 16 montre l'évolution du MSE à travers l'intervalle $[0.1, 100]$ de ce paramètre.

Une valeur de 8 pour ce paramètre semble offrir un compromis acceptable entre le lissage des zones uniformes et la préservation des détails.

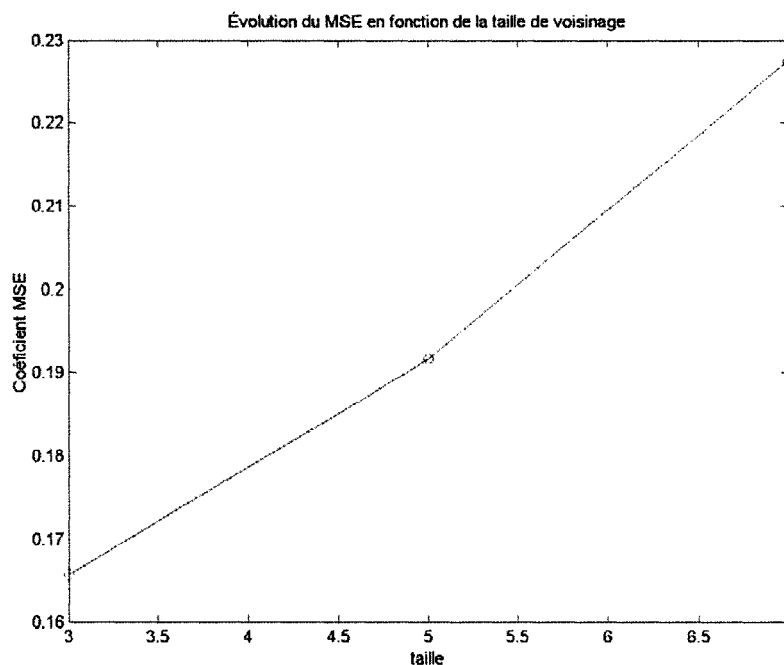


Graphique 16 : Évolution de l'erreur par filtrage gaussien adaptatif et paramètre K

Filtre Wiener

Le seul paramètre à ajuster pour ce type de filtre est la taille du voisinage à utiliser, considérant que la taille de bordure est toujours égale à $2n-1$. Le graphique 16 montre l'évolution du MSE à travers l'intervalle $[3, 7]$ de ce paramètre.

Il semble qu'il faille conserver la taille du voisinage au minimum pour obtenir les meilleurs résultats.



Graphique 17 : Évolution de l'erreur par filtrage weiner et paramètre de taille de voisinage

4.2.3 Comparaison de tous les filtres étudiés

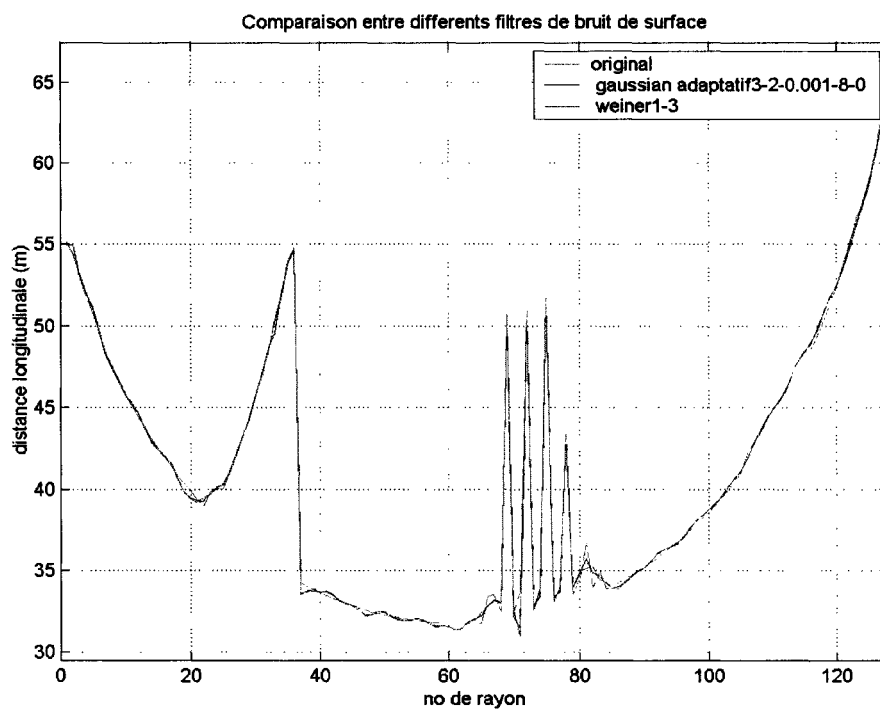
Voici maintenant une comparaison des résultats des différents filtres étudiés, en utilisant leur paramètres optimaux. Le graphique 18 montre tous les profils filtrés et le profil idéal obtenu par simulation.

Nous pouvons constater à quel point les résultats offerts par les différents filtres sont très semblables. Le tableau suivant donne les valeurs de MSE obtenues :

Tableau II

MSE du filtrage du bruit de surface
à l'aide de différents filtres

filtre	MSE
gaussien adaptatif	0,12602
weiner	0,16566



Graphique 18 : Comparaison des différents filtres étudiés

Le filtre gaussien adaptatif semble l'emporter par une faible marge. Ce choix est intéressant d'autant qu'il est facile à implanter, permet un ajustement fin de sa « puissance de lissage » grâce à son paramètre K (plus que le simple choix de taille de voisinage de son plus proche rival : wiener) et est relativement peu demandant en calcul.

Finalement voici une représentation du processus de filtrage dans son entier :

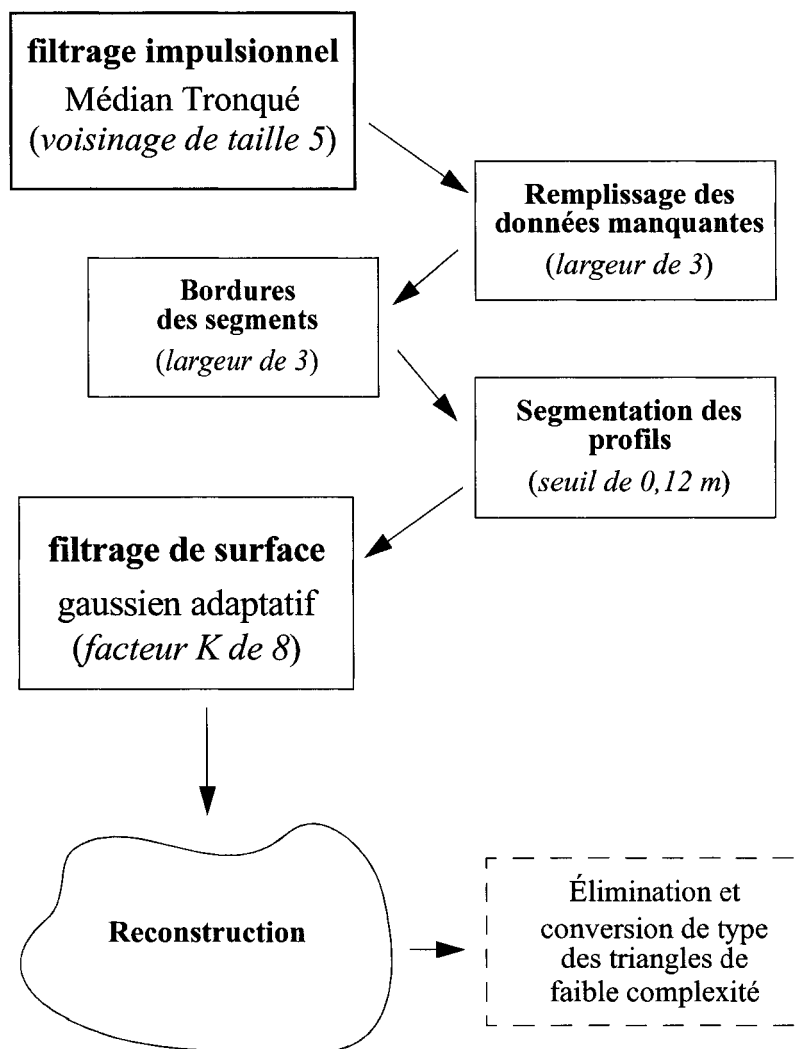


Figure 29 : Processus complet de filtrage des données d'un scan

4.3 Discussion

Dans ce chapitre, un processus de filtrage des données sonar brutes a été élaboré afin de réduire l'impact des données erronées sur la reconstruction des surfaces. Plusieurs types de filtres ont été évalués et un choix a été proposé, basé sur une différence minimale entre un profil idéal et le résultat du filtrage. Le MSE « mean squared error » a été retenu pour mesurer cette différence.

Principales contributions personnelles

La première contribution personnelle concerne la séparation du processus de filtrage en deux étapes distinctes basées sur l'effet des différents bruits plutôt que sur leur cause théorique. Ainsi, il est possible de mettre à profit des techniques mathématiques plus simple qui ont faites leur preuves dans d'autres domaines.

La deuxième contribution personnelle consiste en la modification du filtre médian classique afin de réduire son champs d'action qu'aux données reconnues comme bruit impulsionnel. Essentiellement, ce nouveau « médian tronqué », ne remplace un élément que si la valeur originale est *distinctement* plus *faible* que la valeur médiane de son voisinage.

Également, l'utilisation de seuils croissants avec la distance a permis aux deux étages de filtres de respecter l'augmentation naturelle de l'imprécision des mesures en fonction de l'éloignement de l'obstacle rencontré. Finalement, la généralisation du seuil de distance des discontinuités a permis de pallier l'effet de perspective dans les profils.

CHAPITRE 5

SIMULATION SONAR ET VALIDATION EXPÉRIMENTALE

Ce sous-marin d'inspection sera un outil grandement utile et performant pour l'entretien et la réfection des barrages hydroélectriques québécois. Mais, comme tout système complexe, il n'est pas aisé de l'utiliser correctement sans s'être d'abord entraîné à son maniement. C'est pourquoi il a été décidé, dès les débuts du projet, de mettre en place une station d'entraînement rigoureusement identique et offrant des reproductions suffisamment fidèles des informations produites par les capteurs.

La figure 30 montre comment le module de simulation sonar vient remplacer le système réel en récupérant la communication série.

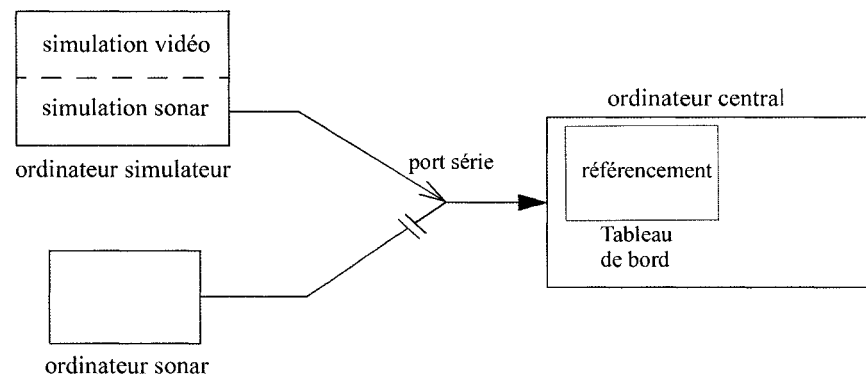


Figure 30 : Schéma montrant le flot de données du simulateur sonar en remplacement du système réel

Nous allons maintenant voir comment le programme du simulateur génère des données virtuelles suffisamment semblables aux données que l'on peut obtenir sur le terrain.

5.1 Simulation

Une fois la théorie acoustique établie, il apparaît évident que toute cette mécanique mathématique ne nous est pas nécessaire et que le simulateur peut se satisfaire d'une simplification des règles du chapitre 2. Également, les capacités de calcul de la configuration actuelle du système de simulation des capteurs (caméras et sonar) est très limitée par rapport à ce qui serait nécessaire pour permettre un taux idéal de rafraîchissement de 5 scans/sec des 128 « lancés de rayons acoustiques ».

Ainsi, pour cette première version du simulateur, certaines décisions stratégiques ont été prises, dont voici les éléments importants.

5.1.1 Engin de simulation 3D

Un logiciel de simulation 3D est un programme qui possède en mémoire une représentation géométrique de l'environnement : le « monde » dans lequel évolue des entités, ainsi que son apparence. Il gère la position de ces entités selon les commandes de déplacement reçue, et génère les images 3D des différents points de vue (qui serviront dans notre cas à représenter les trois caméras virtuelles). Ce genre de système est très complexe à développer et il a été décidé d'en utiliser un existant plutôt que de bâtir une version sur mesure. Son architecture logicielle permettrait également d'y greffer notre générateur de données sonar.

5.1.2 Trajectoires des ondes acoustiques

Pour remplacer les données fournies par le système sonar SM2000, seules les distances des maximums locaux des courbes d'amplitudes sont utiles car elles représentent le début des échos d'obstacle. C'est pourquoi l'algorithme RRA est intéressant. D'un autre côté, comme expliqué par Brutzman [9] et confirmé au chapitre 2.1.2, pour obtenir une bonne précision longitudinale des mesures, la distance qui sépare le véhicule des surfaces balayées doit être

relativement courte et le facteur de diffraction sera généralement faible. Il a donc été jugé suffisant, en mettant à profit la fonctionnalité de détection des collisions déjà fournie par l'engin 3D, qu'une approximation rectiligne soit utilisée pour le suivi des trajectoires acoustiques.

5.1.3 Bruits

Au chapitre 2.1.3, nous avons vu que les sources de bruits étaient nombreuses, mais le chapitre 4 nous a permis de réduire la complexité de la tâche de leur simulation en nous concentrant sur les effets de ces éléments perturbateurs. Deux types de phénomènes sont donc à « ajouter aux valeurs de distances idéales » du simulateur : un bruit impulsionnel et un bruit de surfaces.

Bruit impulsionnel

Le bruit impulsionnel est surtout causé par des particules en suspension, et afin de simplifier le calcul de sommation des probabilités de disperseurs (qui deviendra le seuil d'ajout du bruit impulsionnel), le pourcentage affecté à chaque « cellule » est supposé constant. Cette simplification réduit le calcul à une augmentation linéaire du pourcentage en fonction de la distance, peu importe la position et l'orientation de l'appareil dans l'espace :

$$\sum_{i=1}^n d_i p_i = p \cdot \left(\sum_{i=1}^n d_i \right) = p \cdot D = f_{\text{imp}} \quad (5.1)$$

où :

p_i : probabilité de disperseur de la cellule i

d_i : distance parcourue à l'intérieur de la cellule i

p : probabilité uniforme équivalente

D : distance totale parcourue

f_{imp} : facteur total de probabilité d'un bruit impulsionnel

Lorsque cette probabilité, spécifiée en pourcentage, n'est pas dépassée par un nombre aléatoire (de distribution uniforme), une valeur impulsionnelle est calculée et vient remplacer la distance originale. Cette nouvelle mesure est elle-même générée aléatoirement par un facteur multiplicatif inférieur à 1 (de distribution uniforme également) appliqué à la distance originale. Par ailleurs, un facteur de $100/128$ est ajouté à la probabilité finale pour conserver le sens « un certain nombre de rayons affectés dans le profil » dû au fait qu'il y a plus de 100 rayons et que la probabilité est spécifiée en pourcentage.

Bruit de surface

Afin de modéliser les variations locales de la vitesse du son (qui ne sont pas incluses dans la diffraction verticale introduite par la courbe de vitesses) un bruit gaussien, de moyenne nulle et d'écart type particulier est ajouté à chaque valeur. Cet écart type est augmenté linéairement (voir figure 31) avec la distance à l'obstacle sous la conjecture qu'une plus grande distance parcourue par le front d'onde offre plus d'occasions d'être « micro-ralenti » ou accéléré :

$$\sigma \cdot D = f_{\text{surf}} \quad (5.1)$$

où :

σ : probabilité de disperseur de la cellule i

D : distance parcourue

f_{surf} : facteur total d'écart type du bruit de surface

Ce bruit gaussien crée un effet de flou autour des structures (voir figure 33).

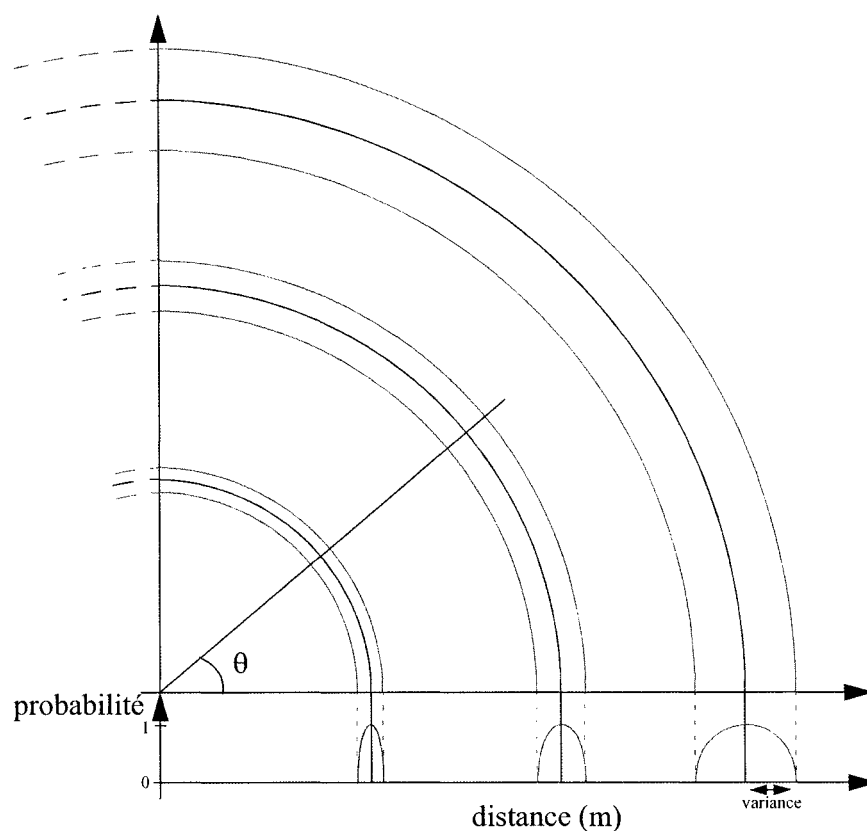


Figure 31 : Profils des probabilités normales du bruit de surface en fonction de la distance radiale à l'origine

Les figures 32 et 33 offrent une démonstration de différents niveaux de bruits générés durant une simulation du balayage de la surface de la prise d'eau du barrage LG2A. Dans la figure 32, la ligne verte indique la position du profil sur la surface. Sur l'affichage du sonar, on peut voir le mur gauche de la cavité de gauche et discerner la grille de la cavité de droite interceptant certains rayons.

Tout ce qui reste à faire pour compléter la simulation d'un lieu, après avoir créé la géométrie de l'environnement, c'est de prendre quelques scans de l'endroit pour estimer les paramètres de bruits.

Voici une suggestion de procédure d'estimation des deux coefficients p , probabilité de disperser, et σ , facteur d'écart type :

- a. Pour estimer la quantité de bruit impulsionnel on peut placer le sous-marin dans une zone du site inspecté avec suffisamment d'espace libre devant le sonar et faire un comptage visuel des points impulsionnels. Ensuite, il suffirait d'exécuter une simulation sonar et d'augmenter les paramètres jusqu'à un niveau **en apparence** satisfaisant.
- b. il est difficile d'estimer la largeur du nuage de points autour des surfaces de barrage avec seulement les échos principaux. En utilisant le mode d'affichage des amplitudes de l'ordinateur sonar, il est plus facile d'évaluer cette dimension (voir figure 6 au chapitre 1). Ensuite, sachant que cette largeur correspond à environs 6 écarts type (99,7%) à une certaine distance, il ne reste qu'à évaluer le paramètre à utiliser :

$$\left(\frac{\text{largeur}}{2 \cdot 3}\right)/D_c = f_{\text{surf}} \quad (5.1)$$

où :

largeur : largeur du nuage de point de la surface

D_c : distance du centre du nuage

f_{surf} : facteur total d'écart type du bruit surface

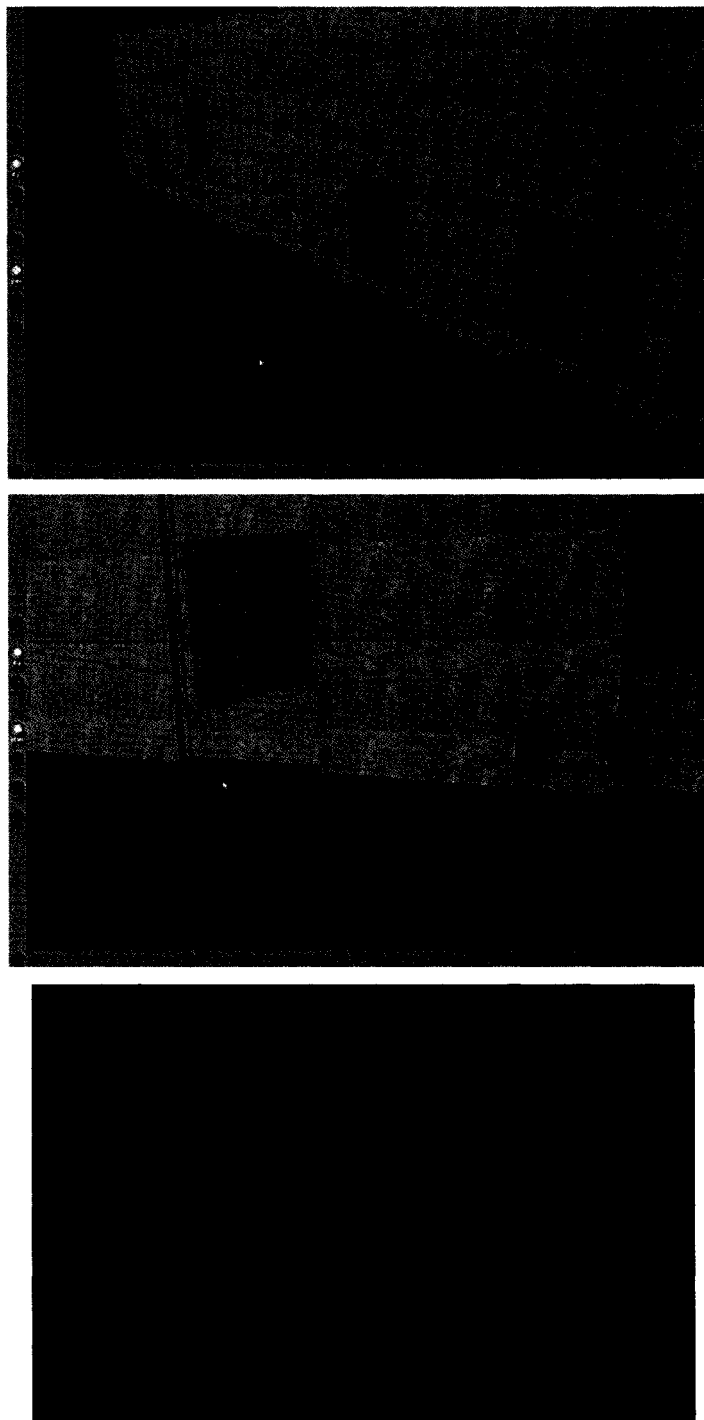


Figure 32 : Représentation 3D de la prise d'eau du barrage LG2A
et prise de mesure d'un profil en particulier

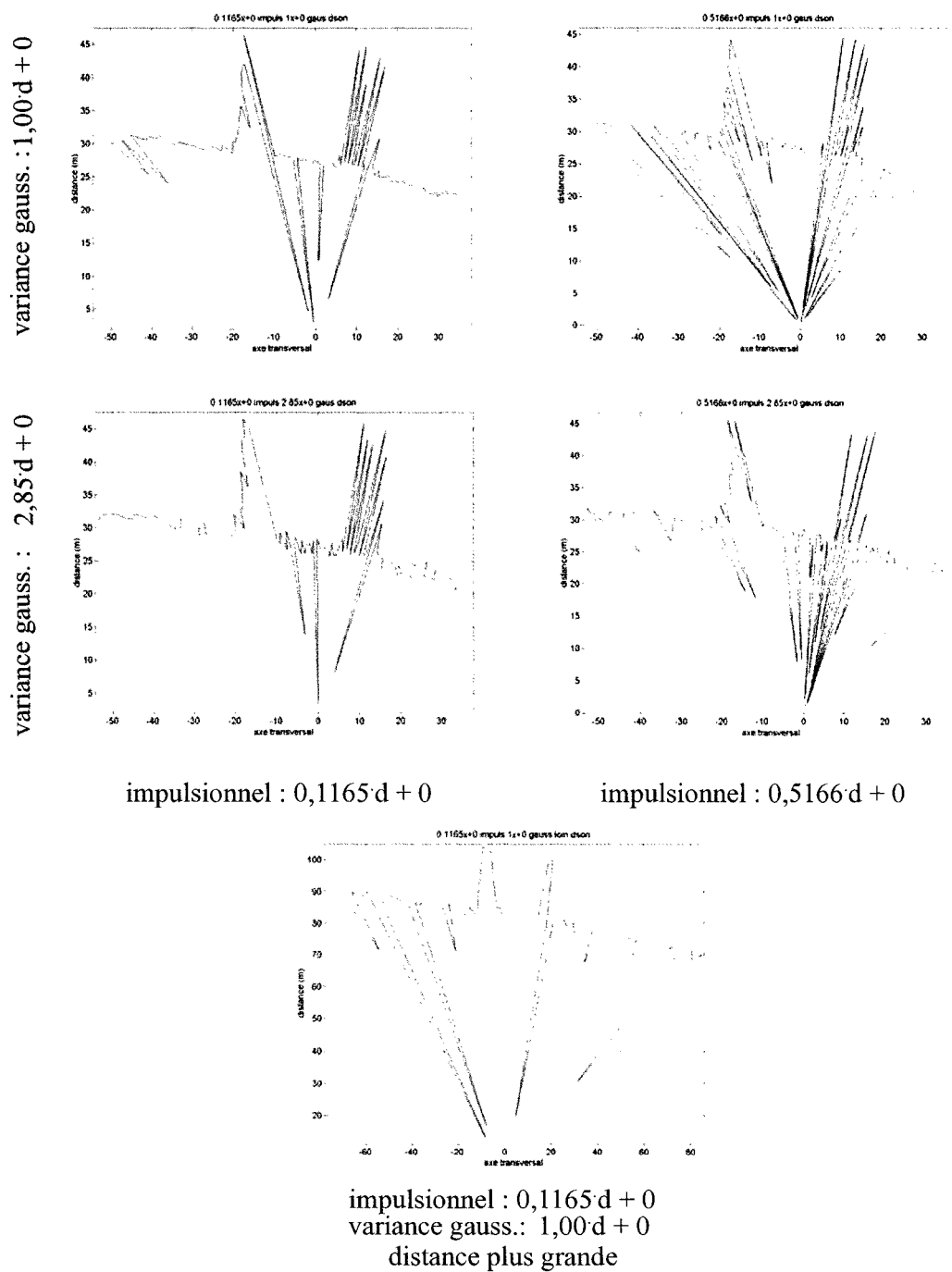


Figure 33 : Ajout de bruits « poivre et sel » et gaussien de différents niveaux aux mesures de distances idéales et démonstration de l'effet de la distance sur la quantité de bruit impulsionnel

5.2 Validation des paramètres acoustiques

Voici des exemples de données réelles¹⁰ prises par balayage du fond d'un bassin :

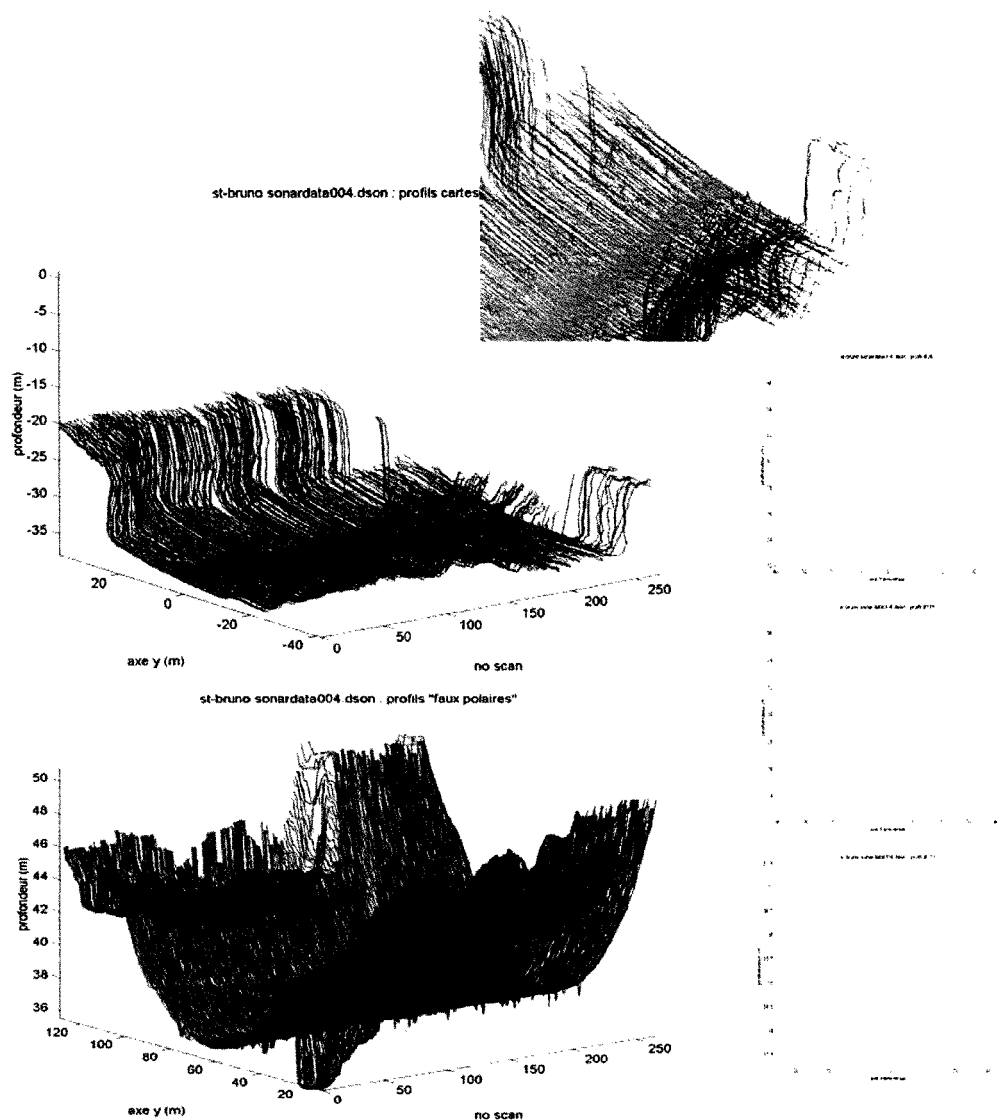


Figure 34 : Empilage des profils d'un balayage de fond marin, en version cartésienne, agrandie d'une section, fausse polaire, et trois des profils sélectionnés

¹⁰ Dans un but de clarté de l'affichage, les « données 0 » ont été négligées aux extrémités des profils et interpolées linéairement à l'intérieur.

Il s'agit d'un simple empilage rectiligne de profils sans égard à la trajectoire réelle du sonar qui permet quand même de distinguer une forme de tranchée, vu la bonne densité des données, mais qui est en fait une version déformée de la réalité. Dans ces figures certains profils ont été dessinés en rouge pour mettre en évidence des occurrences de bruit impulsionnel, bien visible autant dans la version « faux polaire » (représentation cartésienne de donnée polaires) que cartésienne par un étirement dans l'axe vertical.

Nous pouvons constater l'importance de réduire la quantité de bruit dans ces signaux afin de ne pas fausser les géométries obtenues durant la reconstruction.

5.3 Démonstration de l'effet du filtrage sur les données brutes

Les profils cartésiens des figures 33 et 34 serviront à démontrer l'efficacité des étapes de filtrages introduits dans ce projet : filtrage impulsionnel en premier lieu et ensuite ajout du lissage pour le bruit de surface.

Les figure 35 et 36 montrent le résultat de filtrage de la figure 33, et les figure 37 et 38 montrent ceux de la figure 34. Nous pouvons constater que la majorité des bruits impulsionnels ont été éliminés et que le filtrage respecte correctement les formes de la surface que l'on désire retrouver : adoucir pour réduire le bruit, mais ne pas sacrifier les formes pour autant.

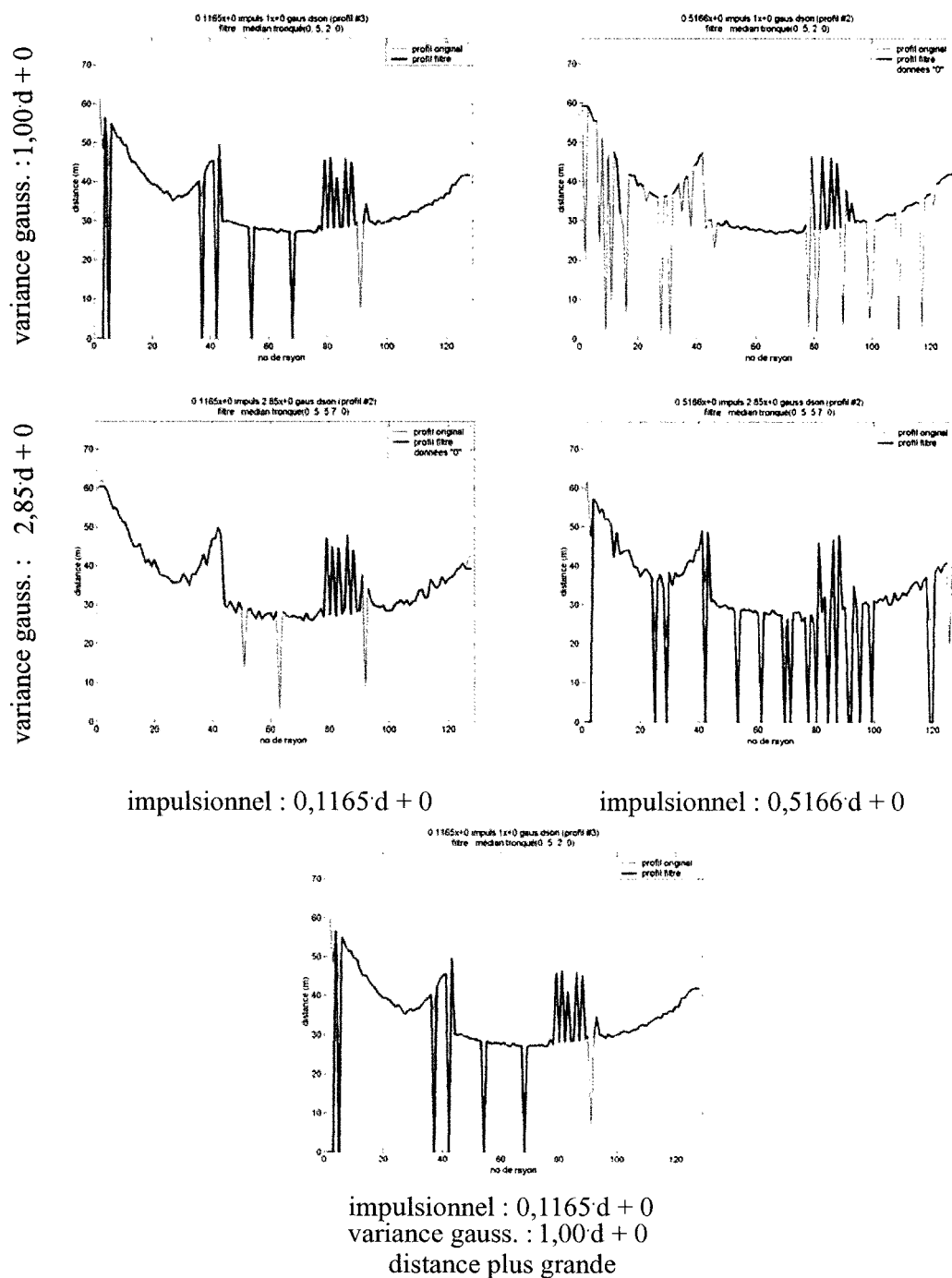


Figure 35 : Démonstration du filtrage impulsif à l'ajout de bruits
« poivre et sel » et gaussien de différents niveaux aux
mesures de distances idéales

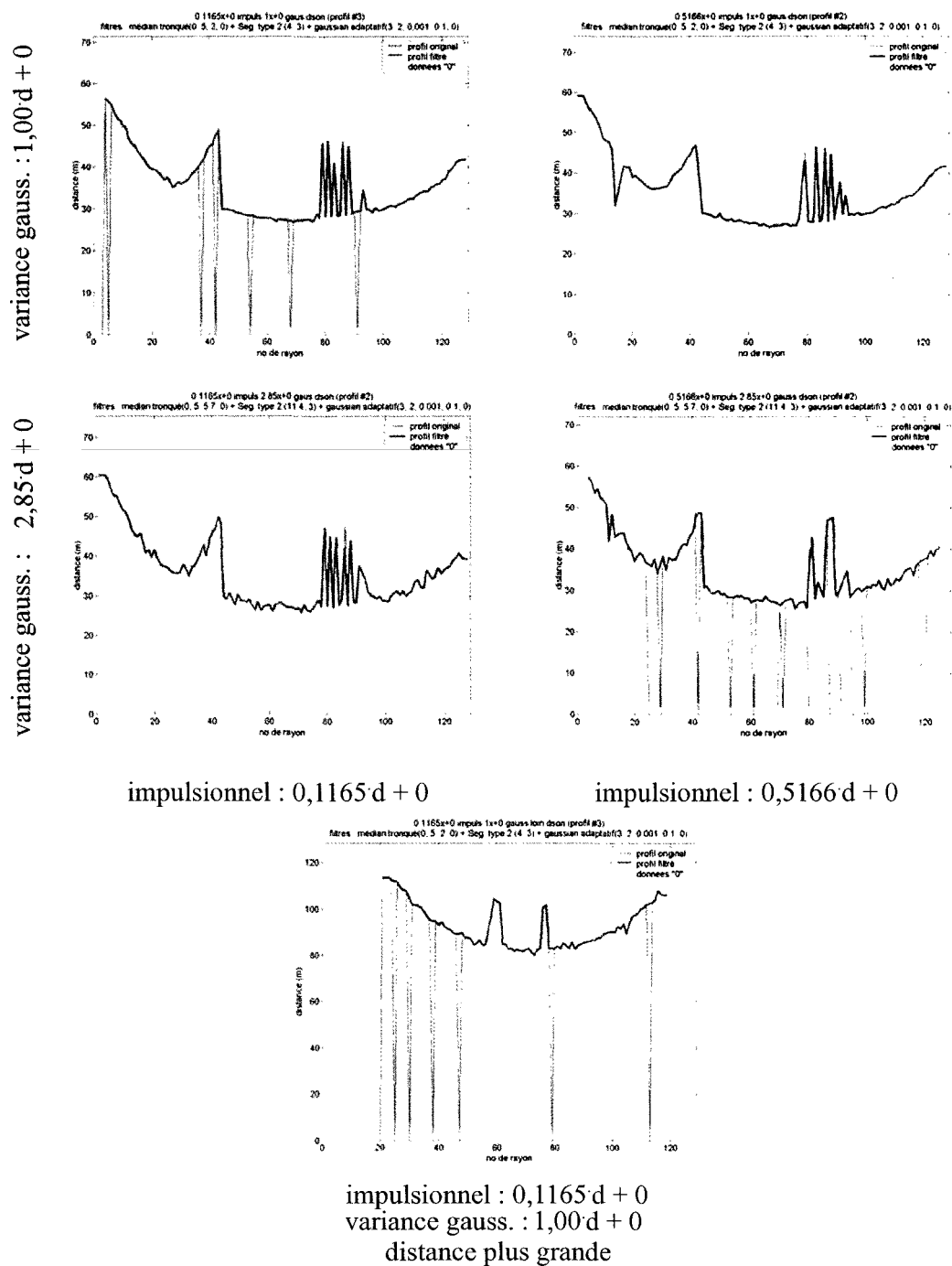


Figure 36 : Démonstration du filtrage de surface à l'ajout de bruits
« poivre et sel » et gaussien de différents niveaux aux
mesures de distances idéales

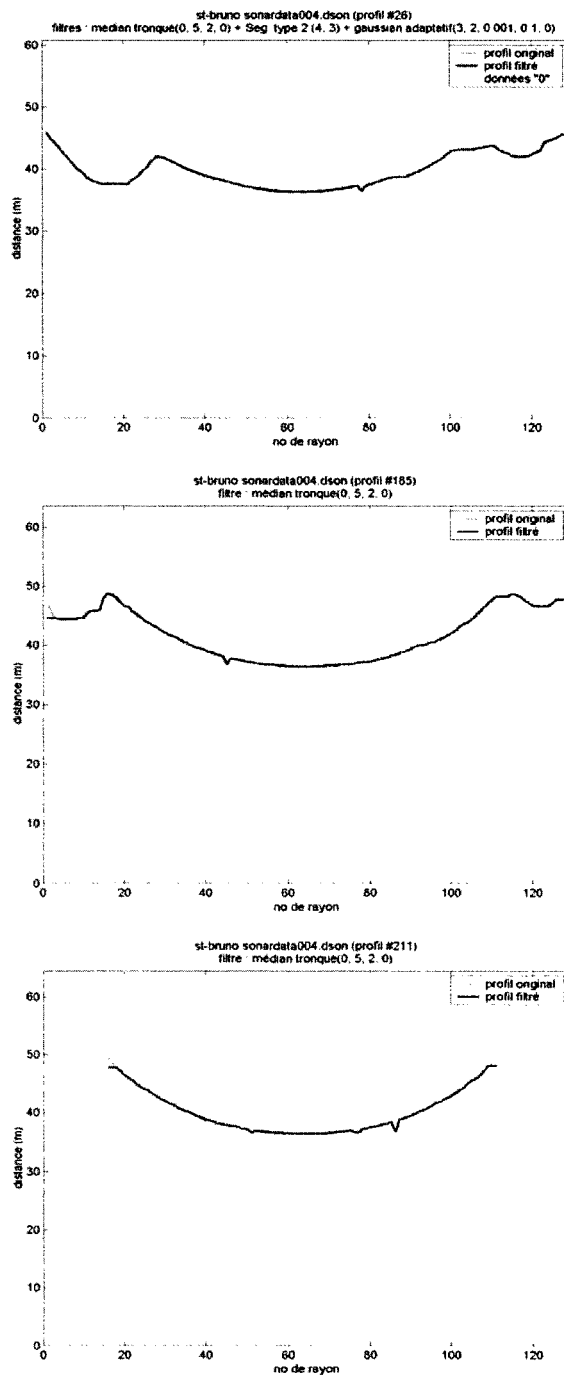


Figure 37 : Démonstration du filtrage impulsif à partir de certains profils de données réelles d'un balayage de fond marin et d'une estimation des conditions de bruit

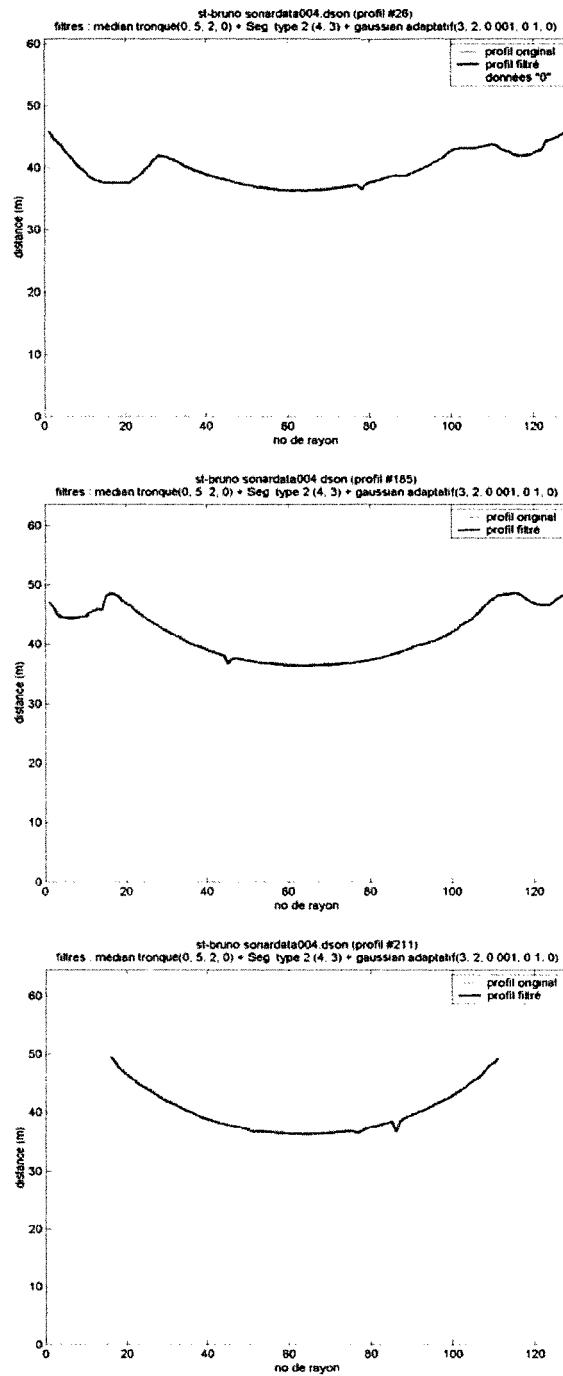


Figure 38 : Démonstration du filtrage de surface à partir de certains profils de données réelles d'un balayage de fond marin et d'une estimation des conditions de bruit

5.4 Discussion

Dans ce chapitre nous avons mis en place un module de simulation sonar basé sur les fonctionnalités de détection linéaire des collisions d'un engin graphique 3D. Ce module possède la capacité d'introduire deux types de bruit habituellement rencontré dans les mesures sonar.

Grâce à ce simulateur il a été possible de générer des données acoustique servant à valider les filtres suggérés au chapitre précédent.

CONCLUSION ET DISCUSSION

Les quatre objectifs principaux de cette première partie étaient de spécifier et de quantifier la chaîne d'imprécision des mesures sonar, la part d'imprécision du processus de référencement, de spécifier une suite de méthodes de filtrage afin d'améliorer la qualité des données brutes et de mettre en place une simulation adéquate du fonctionnement du sonar pour le poste d'entraînement.

Une révision théorique du comportement de la propagation de l'onde acoustique dans l'eau a permis de relever les éventuelles sources d'incertitude et d'imprécision des mesures sonar et de justifier les simplifications algorithmiques employées pour la simulation.

Bien que les hypothèses de départ de ce mémoire indiquaient que ce projet de recherche prenait pour acquis que le système de positionnement fonctionnait toujours de façon optimale ainsi que dans le régime permanent de son processus d'estimation de la position du sous-marin, cette estimation comporte quand même une part d'imprécision qui doit être au moins reconnue, à défaut d'être compensée. Pour unifier les incertitudes acoustiques et de position, le calcul d'un indice qualitatif de la précision des mesures a été proposé. Cet indice sera utile pour la deuxième partie de ce travail, au cours des explications sur le concept d'unification de surfaces.

La complète fiabilité des mesures référencées dépend de l'addition de plusieurs sources d'imprécisions : distance, conditions acoustiques, diffraction des rayons, etc. Mais, selon les spécifications du fabricant du sonar SM2000 et les données du système de positionnement, la meilleure précision à laquelle on peut actuellement s'attendre est d'environ 12 cm. Cette valeur ne permet pas d'obtenir des surfaces de qualité suffisante pour apporter des correctifs aux plans d'ingénierie civile, mais permet de tirer des conclusions sur l'inspection visuelle et le suivi des défauts.

Une procédure satisfaisante d'amélioration de la qualité des mesures sonar brutes a été proposée. Elle s'appuie sur les effets des différents types de bruits sur les données, plutôt que de tenter de détecter, et de justifier, les phénomènes théoriques que l'on retrouve dans la littérature. Elle permet de réduire efficacement l'incidence des bruits impulsionnel causés par des particules en suspension sur le parcours des rayons afin d'éliminer leur effet néfaste sur les géométries reconstruites par la suite. Une comparaison de différents filtres 1D a permis de sélectionner un candidat capable de réduire sensiblement l'introduction de bruits de surface dans les données sonar, sans compliquer inutilement la sélection des paramètres de fonctionnement. D'autres alternatives basées sur la déconvolution ou la restauration de signal pourraient offrir d'autres voies de solution, mais dans un souci d'efficacité et de simplicité, le filtrage par convolution fut retenu.

Malgré tous les efforts déployés pour bien répondre aux objectifs principaux de cette partie, certaines concessions ont dû être faites, que ce soit d'ordre algorithmique ou matériel. Entre autres, le manque d'information à propos de la vitesse de propagation et du véritable maximum des courbes d'amplitude de réception ont limité notre capacité à utiliser toutes les méthodes pertinentes à notre disposition afin d'améliorer la qualité des données sonar brutes. Néanmoins, les méthodes de filtrage proposées semblent suffire à nos besoins.

DEUXIÈME PARTIE

RECONSTRUCTION DE SURFACES

INTRODUCTION

La capacité d'afficher, en temps réel, une représentation claire, simplifiée et synchronisée de l'environnement 3D dans lequel évolue le sous-marin est une fonctionnalité clef du poste de commande du système d'inspection de barrages hydroélectriques proposé par l'IREQ. Entre autres, elle permet au pilote de suivre les déplacements du véhicule sans être gêné par la faible visibilité qu'offrent les caméras vidéo embarquées. Par contre, cette fonction d'affichage 3D demande d'obtenir, au préalable, un plan du site afin de le modéliser en 3D et de l'incorporer au poste de commande, ou d'avoir la capacité de mesurer sur place les dimensions du terrain environnant durant l'inspection. Pour permettre la deuxième possibilité, le système du poste de contrôle doit pouvoir accumuler en mémoire les profils fournis par le sonar et proposer, sur commande, la ou les surfaces équivalentes les plus près possible de la réalité. Ces géométries permettront, en particulier, de connaître l'emplacement des nouveaux obstacles et l'évolution des lieux.

La première partie de ce mémoire a expliqué comment obtenir des mesures sonar dans des circonstances relativement contrôlables et comment évaluer leur justesse. Nous allons maintenant voir qu'à partir de multiples scans il est possible de reconstruire la géométrie 3D de l'environnement immédiat du sous-marin.

Pris dans son ensemble, le processus de reconstruction peut être décomposé en deux étapes distinctes :

- a. **Reconstruction d'une surface à partir d'un balayage.** Cela consiste à établir une relation spatiale entre les données 3D et à constituer des triangles représentant la surface du nuage de points. Cette partie peut être plus ou moins complexe, selon que des points « à l'intérieure du nuage » soient présents et doivent être éliminés. Ou qu'une plus ou moins grande cohérence entre les données puisse être mise à profit : balayage par grille 2D de points laser par exemple. Dans notre cas, il n'y a pas de données intérieures puisqu'elles

sont des mesures de surface. Également, un certain degré de cohérence peut être utilisée grâce aux mouvements continus du véhicule.

Dans la plupart des travaux que l'on trouve dans la littérature, cette étape est plutôt simpliste étant donné l'utilisation d'images de profondeur n'offrant aucune chance de données superposées. Cette organisation spatiale des mesures se contente aisément d'une polygonisation simple par triangles tissés entre les points de la grille. Dans ce projet de recherche, au contraire, la cohérence entre les données de scans consécutifs n'est pas du tout garantie et l'étape de reconstruction revêt une grande importance.

- b. **l'Unification des géométries** de plusieurs surfaces afin de recréer une «super surface» plus complète, qui ne devrait contenir que les sommets de triangles (nommés vertex d'une surface) correspondants à l'union des points 3D des surfaces constituantes. La principale difficulté de cette partie vient de la vérification, et de la correction, d'un éventuel décalage entre les surfaces originales en général dû aux imprécisions cumulatives de la chaîne de mesure.

L'emphase de cette partie a été portée sur l'étape de reconstruction de surfaces. L'étape d'unification a surtout été considérée d'un point de vue théorique : revue de littérature et recommandation d'une méthode appropriée aux résultats de l'étape de reconstruction.

CHAPITRE 6

DÉFINITION DE LA PROBLÉMATIQUE

6.1 Problématique

Un des enjeux majeurs du projet dans son ensemble est de fournir aux inspecteurs-plongeurs, qui sont en fait les véritables utilisateurs de cet équipement, un outil qui ne les brime pas dans leurs manières de faire, dans leurs habitudes d'opération. Ces méthodes de travail sont de toute évidence nées de la nature dangereuse de leur métier, et il est important de les respecter. C'est pourquoi le sous-système de reconstruction devrait permettre au pilote de suivre n'importe quel type de trajectoire durant l'accumulation des mesures : discontinues (pause de prise de mesures) et non-rectiligne, avec rotation et retour sur des emplacements « déjà visités ».

6.1.1 Superposition des données et redondance

Superposition locale

Il arrive régulièrement que le sous-marin soit en présence de courants transversaux qui le déstabilisent. Grâce à des capteurs d'inclinaisons, il réussit en général à maintenir son attitude, mais de petites perturbations restent inévitables. C'est pourquoi le plan horizontal du sonar, son « assiette », est appelée à osciller légèrement et donc faire suivre le point de vue du sonar. Par conséquent on ne peut garantir que les données obtenues soient bien ordonnées, parallèles et non superposées dans l'axe de la trajectoire lors du balayage (voir figure 39). L'étape de maillage des points (ou « polygonisation ») doit donc être capable d'accomplir sa tâche avec des points « semi-structurés », sans quoi les triangles obtenus par ce croisement de profils créeront une géométrie dégénérée qui ne sera pas représentative de la surface réelle.

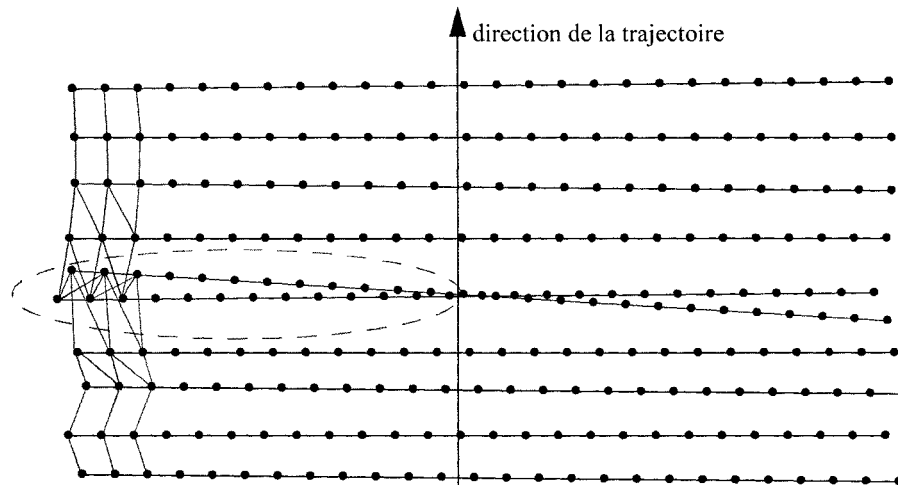


Figure 39 : Léger tangage provoquant la rotation d'un profil sonar et données superposées dans l'axe transversal

Superposition distante

En plus des superpositions locales, engendrées par une oscillation du plan du profil par rapport à l'axe local de la trajectoire, le pilote peut revenir à un endroit déjà visité (retour en arrière ou croisement dans la trajectoire) et obtenir de nouveaux points du même segment de surface. Ces nouvelles mesures auront vraisemblablement une précision différente des premières : distance à la surface, précision instantanée du système de positionnement ou variation des conditions de propagation acoustique. Cela provoquera probablement un décalage entre les deux groupes de points.

Contrairement à la superposition locale, la superposition distante n'est pas simple à détecter, puisqu'il n'existe pas, a priori, de contexte géométrique local pour orienter un plan de vérification. En effet, à moins que sur sa trajectoire le sonar soit toujours orienté à peu près dans la même direction et que le déplacement du sous-marin ne se fasse que dans ce plan (ex : façade plane d'un barrage ou fond d'un bassin à partir de la surface), nous ne pouvons

garantir que la section de surface revisitée le sera du même point de vue. Le problème de superposition ne pourra alors se réduire qu'à une détection en deux dimensions.

6.1.2 Segmentation des profils

Nous avons vu au chapitre 4 qu'il était important de pouvoir séparer les profils en tronçons continus afin d'effectuer un filtrage correct. Cette segmentation est toute aussi importante durant la reconstruction de surfaces à partir de mesures de distances, puisque ces discontinuités indiquent que les surfaces de chaque côté appartiennent à deux parties distinctes de l'objet (voir figure 40¹¹). La façon simple de détecter cette discontinuité, et qui est utilisée par la grande majorité des sources de la littérature, est de valider une différence de distance entre deux mesures consécutives dépassant un seuil de faible valeur.

Ce critère fonctionne très bien pour les images de profondeur, mais entraîne un effet secondaire indésirable dans le cas des profils sonar. En effet, les appareils utilisés pour la prise d'images de profondeur ont habituellement un cône de réception assez étroit (généralement moins de 30°) afin que leurs mesures périphériques ne soit pas perturbées par l'effet de perspective. Au contraire, possédant un angle de vue de 120°, notre sonar subit beaucoup plus l'étirement des distances de chaque côté du profil. Cet effet provoquera, à tort, le dépassement du seuil de discontinuité.

¹¹ Pour les besoins d'illustration du présent document, cette figure a été tirée et adaptée de Soucy [53]

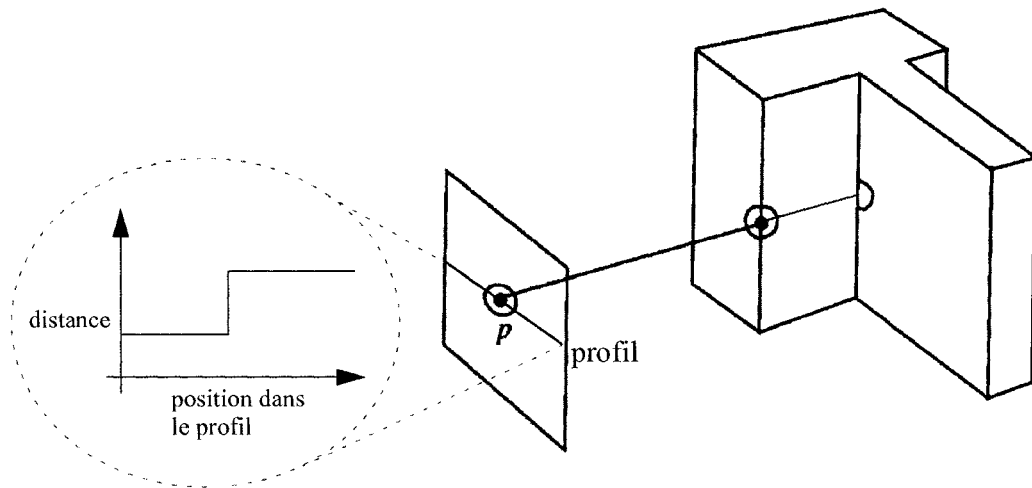


Figure 40 : Projection des distances chaque côté d'une discontinuité 0

6.1.3 Densité des données

L'effet de perspective subi par les profils sonar engendre un autre phénomène qui viendra contraindre le choix d'une méthode de reconstruction. L'écartement des points référencés issus de mesures à angle rasant créera un manque de densité local des données 3D dans certaines zones du nuage de points. La méthode de reconstruction choisie devra être capable de prendre en compte une densité locale variable.

6.1.4 Symbolisme visuel

Une dernière fonctionnalité utile du module de reconstruction est de pouvoir indiquer graphiquement, et de façon simple à comprendre, les lacunes géométriques des surfaces résultantes. Ainsi, le pilote peut retourner aux endroits indiqués et effectuer des balayages complémentaires : que ce soit des trous provenant de « données 0 », ou encore la création de triangles disproportionnés par manque de densité locale ou par discontinuité dans les surfaces réelles.

Bien que chacune de ces lacunes géométriques proviennent de circonstances différentes et que leurs triangles correspondants seront regroupés en ensembles distincts, elles doivent s'accorder sur une représentation visuelle qui permette de les distinguer aisément.

6.1.5 Point de vue

Le format de fichier VRML utilisé pour sauvegarder les résultats de reconstruction permet de spécifier un ou plusieurs point de vue qui sera utilisé dès l'initialisation de l'affichage du contenu du fichier. Ce point de vue devrait placer l'utilisateur face à la surface de façon à la voir immédiatement, et le plus possible dans son ensemble, sans avoir à naviguer pour la retrouver dans ce grand espace qui est vide autrement.

6.2 Revue de littérature

La recherche bibliographique de cette revue de littérature a principalement fait appel à la base IEEEExplore. Les mots clefs *surface reconstruction*, *points cloud*, *unstructured*, *unconstrained*, *range image*, *surface meshing & merging* ont servi de point de départ. La récolte fut complétée par une recherche des autres publications de ces auteurs afin de ne rien manquer. Voici ce qui a été trouvé dans la littérature au sujet de la reconstruction et de l'unification de surfaces. Certaines de ces méthodes peuvent accommoder jusqu'à un certain point les deux étapes, mais la plupart ont été conçues spécifiquement pour l'une ou l'autre.

6.2.1 Méthodes de reconstruction de surfaces

Bien que depuis quelques années la plus grande part de l'attention des chercheurs ait évolué vers l'unification de surfaces, plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour répondre au « simple » besoin de reconstruction d'objets. Certaines même continues à être améliorées actuellement. Beaucoup de ces méthodes sont issues des domaines industriel de

la reconstruction d'objets par balayage laser ou scientifique de l'étude sans contact de vestiges archéologiques. De ce fait, la plupart d'entre elles impliquent l'utilisation d'un système de mesures par projection 3D d'une grille 2D de points, ou l'utilisation de lignes de profils maintenus parallèles mécaniquement, plutôt qu'une seule ligne à la fois d'orientation presque quelconque comme cela est notre cas.

On distingue quatre lignes de pensée en ce qui concerne la reconstruction 3D de surfaces à partir de mesures de distance : les méthodes volumiques, les objets gonflables, les méthodes implicites et de connectivité.

La première ligne de pensée des méthodes volumiques provient essentiellement du domaine médical où de nombreux appareils fournissent une information complète sur toutes les cellules rencontrées dans un plan d'observation et non pas seulement les premières : CAT scan, résonance magnétique, radiologie, etc. Ces méthodes divisent l'espace en cellules régulières, habituellement des cubes, et subdivisent celles-ci jusqu'à ce qu'un nombre maximal prédéfini de points se retrouve dans chacune. Ensuite, la surface polygonale est obtenue en suivant les contours des cellules qui ne sont pas complètement entourées de voisines, voir Hoppe [39] et Curless [40].

Bien que nécessitant beaucoup de mémoire pour allier finesse des formes (grand nombre de références aux cellules) et grandeur d'un barrage à couvrir, cette façon de faire a quand même l'intérêt d'avoir tendance à combler les trous laissés vides par manque de données. D'un autre côté, la forme finale de la surface n'est pas constituée des mesures originales, mais des sommets des cellules, ce qui veut dire que son apparence finale n'est pas directement dépendante des données, mais plutôt du critère de subdivision des cellules. Même si celui-ci était fixé à une valeur très faible, tous les points de la surface résultante seraient nécessairement décalés par rapport aux mesures. Ce constat rend cette méthode moins intéressante pour nous, puisque l'objectif principal du projet est la prise de mesures sur l'envi-

ronnement. Obtenir un résultat de reconstruction qui détériore davantage la précision et qui n'est qu'une imitation des données originales ne semble pas approprié.

La deuxième catégorie des objets gonflables est une extension en trois dimensions de la méthode des contours actifs, Chen [41], Medioni [42] et Hilton [43], largement utilisées en reconnaissance d'image. L'idée est d'étirer (ou de réduire si la forme de départ est à l'extérieur du nuage de points 3D) et de remodeler une sphère jusqu'à rencontrer et épouser la forme des points afin d'obtenir une description mathématique de l'objet à l'aide des courbes constituant le « ballon » ainsi déformé. Cette technique ne fonctionne bien que pour les objets grossièrement convexes et relativement réguliers. Un long tube demandera un grand effort d'étirement d'une certaine zone du ballon et créera un manque dans la densité locale d'information. Également, elle ne réagit pas très bien à la présence de bruit, puisqu'elle n'a aucun effet moyennant sur les données et qu'un « pic » intérieur bloquera l'expansion. Finalement, elle n'est d'aucune utilité pour les objets ouverts tels que les surfaces de barrages de ce projet.

La catégorie par représentation implicite, Hoppe [44], Fua [45] et Ronghua [46], tente pour sa part de trouver une reconstruction géométrique acceptable à partir d'une conversion en une représentation implicite des données (voir revue de littérature de la méthode implicite au chapitre 6.2.2 pour plus de détails), d'une repolygonisation (« contour tracing ») et d'une simplification par critères de coplanarité (voir figure 41¹²).

La principale difficulté que cette méthode a dû surmonter est le calcul des « distances minimales à la surface » nécessaires à la conversion en représentation implicite. Pour les obtenir, puisque l'information d'entrée n'est pas une surface mais un nuage de points, il faut utiliser des plans tangents en chaque point, créés à partir de leur voisinage.

¹² Pour le besoin d'illustration du présent document, cette figure a été tirée de la page web <http://research.microsoft.com/~hoppe/>.

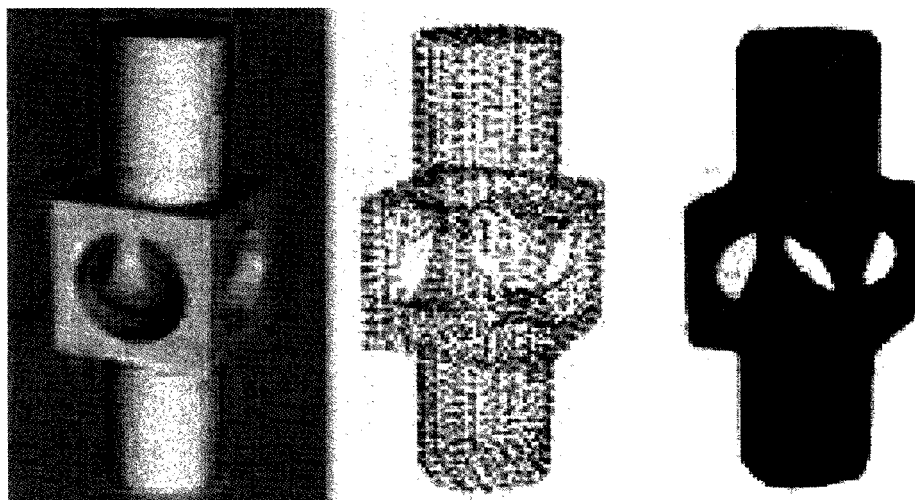


Figure 41 : Exemple de reconstruction par la méthode de Hoppe

Malheureusement, ce processus montre une forte tendance à déformer et à arrondir les coins (voir troisième image de la figure 41) de la géométrie sous-jacente, vu l'utilisation d'une approximation de la surface réelle lors de la conversion implicite. Malgré tout, cette méthode est un bon compromis lorsque le nuage de points à reconstruire est la seule donnée disponible et qu'aucune autre information sur les normales de la surface sous-jacente ou sur la cohérence exploitable n'est accessible. Également, les résultats obtenus sont intéressants lorsque l'objet considéré est de nature fortement régulière, puisque la dernière étape de simplification des polygones fait apparaître des plans. Certains barrages ont été bâtis selon cette architecture (par exemple l'entrée d'eau de LG2A), mais ce n'est pas le cas de tous. Une autre contrainte importante est que l'algorithme suppose que les k points les plus proches d'un point, qui serviront à construire le plan local, sont les mêmes que les k points 3D voisins. Cette supposition est rarement respectée lorsque l'objet sous étude est mince ou présente des crevasses ou des replis sur lui-même.

La dernière ligne de pensée rencontrée dans la littérature se contente d'établir la connectivité entre les points 3D originaux. La suite d'opérations de mise en forme des données est plus ou moins élaborée selon les auteurs, mais tous terminent par une triangulation de

Delaunay. Cette méthode de mise en place de la connectivité entre des points 2D ou 3D sans organisation, que l'on peut aussi qualifier de « *dual* » du graphe de Voronoï, permet d'obtenir des triangles les plus équiangles possibles et donc relativement réguliers. Cette caractéristique permet de respecter au mieux les densités locales. Le lecteur intéressé à en savoir plus peut consulter la grande quantité de littérature disponible sur le sujet, et se référer à Sibson [47] en particulier.

La complexité d'application de la triangulation varie grandement selon le domaine d'application de ces différents projets. Certains chercheurs, Chen [48], Potmesil [49] et Vemuri [50], utilisent une projection cylindrique globale des données afin de simplifier la triangulation au domaine 2D. Cette façon de faire s'inspire souvent de l'appareillage utilisé : capteur de mesures fixe pointé sur un objet de petite taille installé sur une table tournante. Elle permet surtout de ne pas avoir à se préoccuper de la sélection du voisinage des points 3D. Par contre, une contrainte importante est que l'objet sous étude ne peut contenir de trous ou de crevasses non radiales, sans quoi la projection cylindrique ne convient plus (voir figure 42).

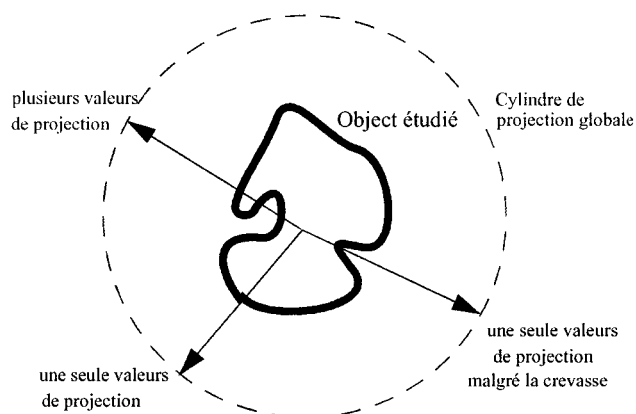


Figure 42 : Éléments de géométrie acceptables d'une projection cylindrique

D'autres, comme l'algorithme Crust/COCONe d'Amenta [51] et SUPERCOCONe de Dey [52], utilisent le résultat de la triangulation 3D, ou « tétraédrisation », en ne gardant que les segments de Delaunay dont les deux extrémités font parties des points 3D d'origine et sont

suivis de certaines étapes de redressement et d'élimination des triangles mal formés (voir une démonstration graphique d'une version 2D du processus à la figure 43¹³).

Cette méthode semble donner de bons résultats et la mise en place de la reconstruction sectorielle par séparation grossière en *octree* des données sources permet à SUPERCOONE d'être également efficace en mémoire et en temps de calcul, même avec des nuages de l'ordre des millions de points. Elle semble intéressante également du fait qu'elle n'est pas restreinte aux objets fermés ou carrément convexes.

Finalement, certains chercheurs ont développé une technique (Soucy [53] et Soucy [56]) qui permet de séparer les régions d'une vue de façon à pouvoir les reprojeter sur un plan particulier à chacune et y effectuer une triangulation 2D individuellement, avant de les recombier en 3D. La technique semble efficace. Elle a d'abord et avant tout été conçue pour réaliser l'unification des surfaces, mais rien empêche d'en avoir qu'une seule à reconstruire. Le seul problème est que dans la version expliquée par ces articles, cette méthode suppose l'utilisation de mesures 3D prises sur une grille 2D et ne fait aucun effort de réorganisation des données en pré-traitement.

Il nous faudrait donc effectuer une projection sur un plan (ou une courbe paramétrique quelconque, comme un cylindre) des mesures avant de fournir ce résultat intermédiaire à l'algorithme. Sans parler qu'il est mentionné dans un des articles que les auteurs travaillent actuellement à généraliser la méthode afin d'accepter justement ces nuages de points 2D désordonnés, mais qu'aux dernières nouvelles ce n'est pas encore possible.

¹³ Pour le besoin d'illustration du présent document, cette figure a été tirée de Amenta [51].

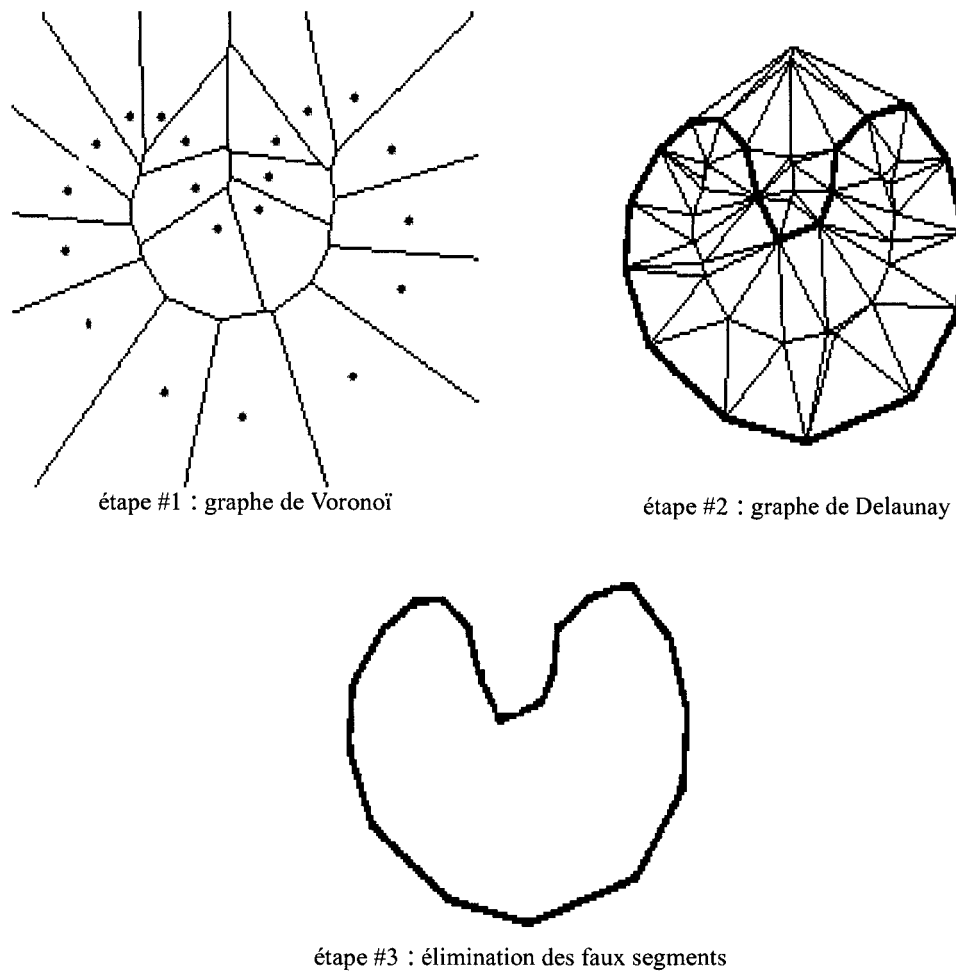


Figure 43 : Démonstration 2D du concept de l'algorithme Crust : graphes de Voronoï, de Delaunay et final

6.2.2 Méthodes d'unification de surfaces

Le processus d'unification de surfaces afin d'en obtenir une plus complète a reçu beaucoup d'attention ces dernières années. Les premiers essais de modélisation d'objet étant trop limités par l'utilisation de restrictions matérielles il était clair que la communauté scientifique et le domaine industriel avaient besoin de méthodes offrant plus de liberté en acceptant des données issues de plusieurs points de vues quelconques.

Tout comme plusieurs méthodes mises au point pour l'unification pouvaient être utilisées pour la reconstruction, la plupart des méthodes présentées précédemment peuvent être utilisées à nouveau :

- a. les méthodes volumiques sont aussi utilisables pour l'unification de surfaces, puisque le processus principal d'accumulation et de subdivision des cellules contenant des points 3D ne s'inquiète pas de savoir si les données qu'on lui fournit appartiennent à plusieurs surfaces ou non. Par contre, en plus du fait que la surface engendrée n'est pas tout à fait la même que les données d'entrée, cette technique ne peut pas vraiment réduire la redondance des points selon leur appartenance à un élément de surface de l'objet réel, mais seulement selon l'appartenance à une même cellule. De ce fait, et en présence de mesures sonar avec une imprécision non-négligeable, il est impossible de prévoir quand un point 3D se verra déplacé vers une sous-cellule voisine à cause de l'erreur de position qu'il traîne avec lui;
- b. de la même façon, les méthodes par objets gonflables peuvent être réutilisées puisque l'étirement de la sphère viendra rencontrer tous les points présents, peu importe leur appartenance à une surface. Malheureusement, leur intérêt limité à l'étape de la reconstruction reste tout aussi limité en unification, en particulier leur incapacité à réduire la redondance des points;
- c. les méthodes de connectivité telles CRUST et COCONE, très intéressantes en reconstruction, sont moins utiles en unification. Tout comme les deux méthodes précédentes, elles sont capables de travailler avec des lots de données appartenant en réalité à plusieurs groupes, mais sont incapables de réduire la redondance et produiront énormément de vagues et de crêtes dans le résultat final en raison du bruit;
- d. la repolygonisation après une conversion en représentation implicite d'un nuage de points est la dernière méthode issue de la reconstruction qui puisse être étendue à l'unifi-

cation de surfaces dans un contexte très limité. Elle reste peu utile en réalité, du fait qu'elle ne peut que prendre toutes les informations telles qu'elles se présentent.

Il existe également quelques avenues de recherche vraiment ciblées vers l'unification de surface avec réduction de la redondance des points :

- a. l'utilisation de la représentation implicite des surfaces : au lieu de donner explicitement les coordonnées des vertex de la surface, une fonction de champs calcul la distance minimale à la surface de chacun des points de la grille 3D. Dans cette représentation, la surface explicite source correspondent aux points où la fonction de champs prend une valeur nulle. Il est ensuite simple d'effectuer une élimination de la redondance de plusieurs fonctions de champs superposées en calculant une valeur unique à chaque point de la grille globale, la stratégie la plus populaire étant la moyenne. Finalement une repolygonisation, à l'aide d'un algorithme comme le suivi de cube (« marching cubes ») Wyvill [54] ou le suivi de triangles (« marching triangles ») Hilton [55], permet de retrouver une surface explicite pour fin d'affichage.

Une autre utilisation de la représentation implicite à été mise au point par Hilton [57] et [58] : au lieu de n'utiliser que les points 3D non organisés et la surface normale engendrée par leur voisinage comme information de départ, la surface complète déjà reconstruite sert à la conversion en implicite. Ainsi, il n'y a aucune estimation qui soit faite et la surface obtenue après repolygonisation est bien plus fidèle à l'originale.

- b. La méthode surfacique d'unification de surfaces par diagramme de Venn de Soucy [53] consiste, en premier lieu, à déterminer dans chacune des surfaces reconstruites à partir d'images de profondeurs, les zones communes afin de construire un diagramme de Venn (mise en relation des éléments communs à plusieurs ensembles) des triangles à unir. Ensuite, les données 3D des sections du diagramme représentant des intersections d'ensembles, en privilégiant dans l'ordre les zones représentant le plus grand nombre de groupements, sont reprojctées dans un plan perpendiculaire à la zone afin de réduire la

complexité de la réduction de la redondance au domaine 2D. Finalement, les sections de surfaces résultant de l'unification locale sont jointes entre elles et avec celles qui n'auront pas été modifiées par absence de redondance, à l'aide de triangles « tissés » entres-elles. L'aspect de la réduction de redondance est accomplie en subdivisant chacun des plans 2D locaux en zones appelées *bucket* qui servent à identifier les points superposés en les accumulant et en calculant, encore une fois à l'aide d'une moyenne des coordonnées, un point unique.

Le principal défaut de cette approche vient du fait que seules les surfaces comportant de la redondance sont modifiées. Ce qui veut dire que le résultat de leur simplification sera une surface de la même silhouette, mais légèrement décalée dans l'espace (résultat du moyennage de points issus de surfaces dont les conditions de précision sont différentes). Un phénomène visuel d'escalier va donc apparaître entre les sections de surfaces au niveau des jointures entre elles.

6.3 Discussion

Dans ce chapitre nous avons vu qu'il était préférable de séparer le processus de reconstruction en deux étapes distinctes : la reconstruction des géométries, et l'unification des surfaces. Nous avons passé en revue les grandes familles de méthodes de reconstruction et celle de l'unification.

CHAPITRE 7

APPROCHE PROPOSÉE ET DÉVELOPPEMENT ALGORITHMIQUE DE LA SOLUTION

7.1 Approche proposée

La solution de reconstruction qui est présentée maintenant tente de répondre aux deux principaux objectifs de cette partie : d'abord et avant tout une reconstruction qui respecte au mieux les informations d'origine, et ensuite, qui soit relativement économe en ressources de calcul. Elle tente de répondre adéquatement à la fois aux conditions soulevées dans la section de problématiques et de fournir une stratégie de reconstruction de surface basée sur les méthodes surfaciques d'établissement de la connectivité entre les points du nuage.

7.1.1 Contraintes et conditions d'opération

7.1.1.1 Superposition des données

Superposition locale

La détection de la superposition locale consiste à vérifier si deux profils consécutifs d'un balayage se croisent dans l'espace (voir la figure 39 à la section 6.1.1). Cette détection peut être simplifiée en une détection en deux dimensions de l'intersection entre deux segments dans le plan de la trajectoire locale (voir figure 44) grâce à l'hypothèse que le sous-marin ne peut se déplacer ou se retourner très rapidement par rapport à la fréquence d'acquisition des profils sonar.

Le plan de vérification, entre un profil courant et son précédent, peut donc être bâti en prenant un point d'encrage et une normale : le point 3D du rayon central du profil courant et le vecteur le reliant à la position 3D du sonar.

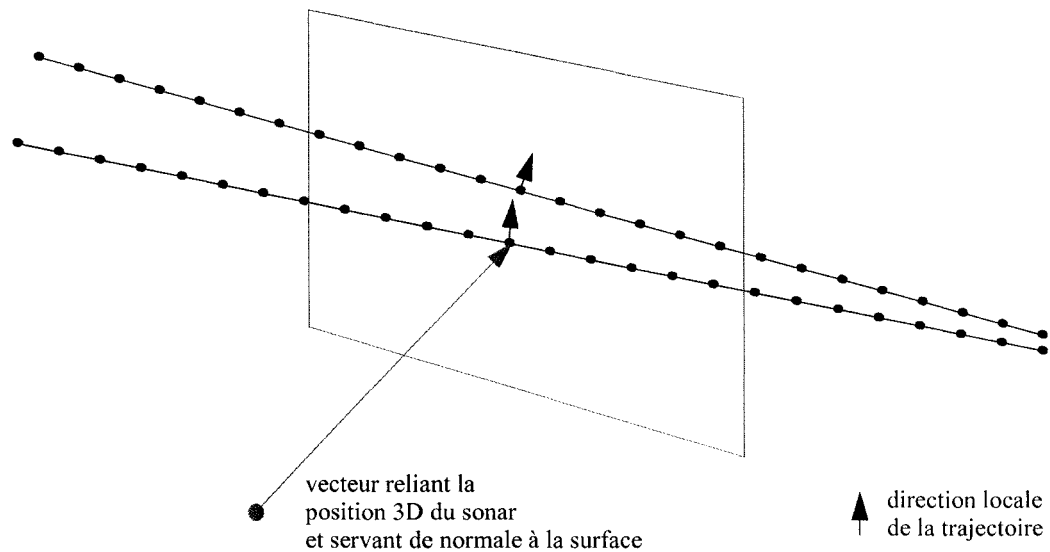


Figure 44 : Plan de vérification de superposition locale

D'un autre côté, nous allons voir dans la section sur l'établissement de la connectivité que cette condition locale de superposition n'affecte réellement que la plus simple des méthodes.

Superposition distante

La superposition distante des points du nuage est une condition plus difficile à détecter. Il s'agit de scans d'un même balayage qui représentent des mesures d'une même section de surface de l'objet, mais qui ne sont pas voisins proches dans l'ordre des profils accumulés. On pourrait imaginer un seuil de distance minimale entre tous les points, en prenant bien soin de ne pas inclure le voisinage immédiat à chaque itération.

Ces superpositions pourraient créer des incohérences visuelles sous forme d'un léger décalage entre les deux sections de surfaces obtenues à cause des imprécisions du système. Ce qui rend si dérangeant cet effet secondaire est que toutes les méthodes existantes supposent que le nuage de points à connecter ne propose pas de points superposés et que tous décrivent de façon unique un élément individuel de surface. Ainsi, aucun effort de sélection du meilleur point ou de moyennage de ceux-ci n'est entrepris afin de simplifier l'information redondante.

Alors, même s'il était efficacement possible de détecter cette situation, elle ne pourrait être aisément corrigée dans cette étape de reconstruction. À l'opposé de cette incapacité, nous avons vu précédemment que certaines des méthodes d'unification de surfaces proposaient cet effet de moyennage et de simplification.

7.1.1.2 Représentation des lacunes géométriques

Considérant les capacités visuelles 3D évoluées du poste de commande, les triangles générés au cours de la reconstruction seront affichés à l'aide de couleurs significatives :

- a. rouge : triangle disproportionné dû à une discontinuité 0;
- b. jaune : faux triangle issu du remplissage de données manquantes (données « 0 ») ou de bruit impulsionnel;
- c. orange : triangles reconstruits valides, mais disproportionnés à cause d'un manque de densité des données;
- d. autres couleurs : surfaces correctement reconstruites, de couleurs variées pour chaque surface, et nuancées pour les sections de surfaces les composants.

Le fichier au format VRML, utilisé pour sauvegarder les surfaces individuelles reconstruites, sera structuré de façon à regrouper les triangles par type/couleur et permettre d'ajuster la visibilité des différentes catégories. Ainsi, l'utilisateur pourra se concentrer sur les géométries dont il a besoin.

Nous allons maintenant voir comment elles seront obtenues.

Connectivité des discontinuités

Les espaces entre les points appartenant à des segments différents ne doivent évidemment pas être connectés par des triangles dans la « géométrie officielle », puisque celle-ci ne représenterait pas la réalité. Par contre, en les conservant dans un ensemble spécifique, ces triangles pourraient servir d'indication à des lieux présentant des lacunes qu'il serait bon de combler.

Connectivité des trous

Lorsque le sonar ne reçoit aucun écho dans la direction d'un certain rayon, ou que la courbe d'amplitude de ce rayon ne dépasse pas le seuil de détection des retours, il retourne la valeur 0 comme information pour ce rayon. Cette valeur nulle provoquera un manque dans le profil et apparaîtra comme un trou dans la surface reconstruite. Bien qu'en théorie l'on ne puisse boucher ce trou puisqu'aucune information n'est disponible, l'expérience des prises de mesures sur le terrain montre que, bien souvent, une surface est effectivement présente à cet endroit. C'est pourquoi le processus de filtrage propose une étape de remplissage des petits manques, ce qui pourrait réduire leur incidence sur les surfaces 3D. Malgré tout, il arrive que des espaces vides de largeur suffisante pour ne pas être remplis soient fournis par le sonar. Dans un but surtout cosmétique, mais également de simplification visuelle, il pourrait être utile, encore une fois, de générer, par une interpolation linéaire, les triangles com-

blant ces trous. En les regroupant dans un ensemble indépendant, il sera possible de les faire disparaître si l'on ne veut pas d'une fausse apparence de surface continue.

Connectivité du manque de densité de données

Provenant surtout du fait de la grande largeur de cône de mesure du sonar, il arrive souvent que les rayons acoustiques arrivent à angle rasant des surfaces (voir chapitre 4 pour une explication visuelle des conséquences sur les mesures). Cette circonstance provoque souvent une élongation des mesures, mais sans discontinuité, et donc sans séparation par segmentation, qui étirera les triangles obtenus.

En utilisant l'indice de complexité des triangles $C = \text{Aire}/\text{Périmètre}^2$ il est simple d'identifier ces triangles handicapés par la faible densité de données locales et d'altérer leur couleur.

Connectivité des triangles de bruit impulsional

Les mesures qui ont été désignées comme bruit impulsional au chapitre 4 ont été remplacées par des valeurs plus en accord avec leurs voisins immédiats. Par contre, il peut arriver des situations où un objet mince se prolonge non pas dans le sens du profil, mais plutôt de travers à celui-ci : par exemple, les barreaux d'une grille. Dans ce cas, ces points n'auraient pas dû être éliminés afin de préserver les formes pertinentes de l'environnement.

Il s'agit alors de parcourir les étiquettes des données pour retrouver ces points impulsionnels et, une fois la connectivité établie, vérifier s'ils ont des voisins 3D du même type. Si c'est le cas, les coordonnées doivent être échangées pour leurs valeurs originales et les triangles utilisant ces points doivent être classés, et colorés, comme discontinuités. Le seul détail à ne pas oublier est qu'il se peut que *deux* points consécutifs d'un même profil portent

cette étiquette. Alors, le triangle formé de ces deux points et d'un voisin commun ne doit pas être classé discontinuité, mais plutôt être manipulé comme un triangle normal.

7.1.2 Point de vue

Étant donné que les trajectoires suivies durant les balayages peuvent être très variées, il est difficile d'établir une stratégie de choix de point de vue qui soit satisfaisante dans tous les cas. Quoiqu'il en soit, et considérant les modes d'opération du sous-marin, nous pouvons quand même obtenir un point de vue global permettant de positionner une bonne part de la surface à l'écran, la plupart du temps. Pour ce faire, une moyenne des différentes positions et orientations en cours de balayage sont calculée. Afin de ne pas fausser les calculs, ces positions et orientations ne sont pas celles du scan, mais celles du centre de la section de profil contenant des données. Ensuite, une translation négative dans l'axe de l'orientation moyenne est ajoutée afin d'avoir plus de recul. Cette translation est établie au double de la moyenne des mesures de distance au centre de chaque section de profil.

7.1.3 Connectivité entre les points

Il est clair que ce module de reconstruction n'est qu'un des composants logiciels du poste de commande et que d'autres fonctions ont priorité dans l'attribution des ressources de calcul. Également, même si le processus de reconstruction n'est pas exécuté au fur et à mesure de la réception des données mais après coup et sur demande, certaines des méthodes qui seront expliquées dans la revue de littérature sont réputées être capable de générer de bons résultats malgré des conditions très complexes géométriquement, mais demandant énormément de temps de calcul. Il serait peut-être un meilleur compromis d'utiliser une solution moins absolument générale, mais plus rapide, afin de rendre plus « interactifs » les résultats de reconstruction et donner à l'opérateur l'occasion d'utiliser ces géométries durant l'inspection. Afin d'atteindre ce niveau de performance, la méthode pourrait d'ailleurs très certainement mettre à profit la cohérences que l'on peut trouver dans les données.

Les éléments de cohérence utilisables proviennent de trois sources :

- a. un profil sonar possède une organisation physique rigide permettant d'affirmer que deux points voisins du profil sont également voisins sur la surface;
- b. comme le sous-marin évolue dans un milieu où les inerties sont très fortes et qu'il possède une puissance de propulsion limitée, il ne peut bouger très rapidement. Ces déplacements et rotations lents entraînent que les changements de positions du sonar se feront de façon relativement régulière. Surtout si la vitesse de propulsion est assez élevée pour que la différence de position entre chaque scan soit plus grande que la précision du système de positionnement;
- c. finalement, le sonar étant fixé au véhicule qui est adéquatement contrôlé pour se maintenir dans le plan horizontal, les profils obtenus devraient tous être plus ou moins dans le même prolongement horizontal.

Il est certain que l'on ne peut se contenter de ces éléments de cohérence, puisque certains d'entre eux ne peuvent être garantis en tout temps. Cependant, il est quand même possible de les mettre à profit pour simplifier la complexité de nos algorithmes. Nous allons maintenant voir les méthodes de connectivité utilisées en différentes circonstances.

7.1.4 Connectivité simple

Une série de scans suffisamment parallèles pour ne pas se chevaucher dans l'axe de la trajectoire forment un groupe dont la connectivité peut être facilement établie entre les scans par simple continuité temporelle (voir figure 45).

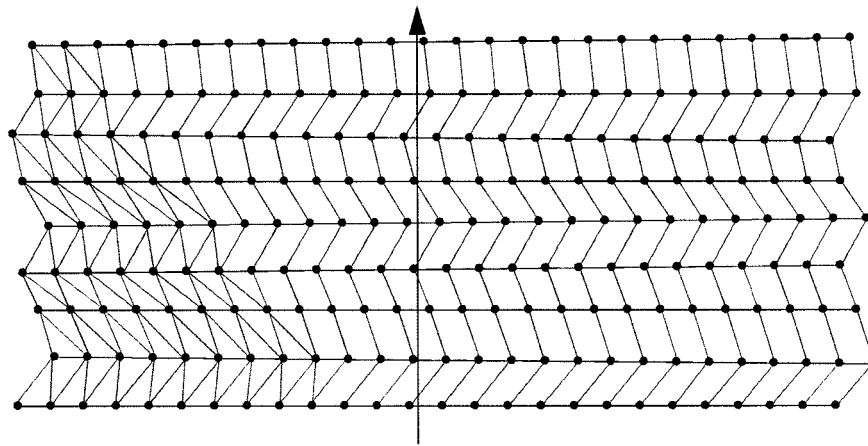


Figure 45 : Représentation « en fil de fer » de la connectivité par continuité temporelle

Dans ce cas, les triangles peuvent être formés par un lien avec le point suivant du scan et le point équivalent du scan précédent pour le triangle de gauche d'une « cellule », et le point suivant avec l'équivalent du scan précédent et son suivant pour le triangle de droite (voir figure 46).

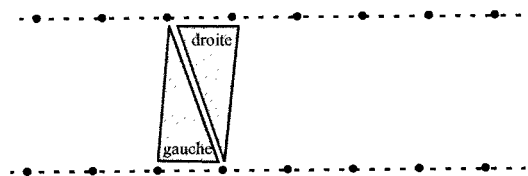


Figure 46 : Maillage d'une cellule entre deux scans consécutifs

Le principal intérêt de cette méthode est sa capacité à générer une connectivité peu importe la complexité de la trajectoire et des surfaces rencontrées, en autant que les données ne se

superposent pas localement. Ainsi, le sous-marin pourrait être en train de faire le tour d'une colonne, balayer l'intérieur d'une cavité ou à travers une grille, etc. En autant que le pilote respecte une vitesse minimale et une trajectoire principalement perpendiculaire au plan du sonar, les scans seront localement distincts.

7.1.4.1 Décalage transversal des scans et « point équivalent »

Malgré son apparente simplicité, une condition particulière doit être vérifiée avant le maillage : il est possible que par rotation transversale du sonar durant le balayage, le scan courant soit légèrement décalé latéralement par rapport à son précédent. Ce décalage, s'il n'était pas compensé, étirerait inutilement les triangles obtenus (voir figure 47).

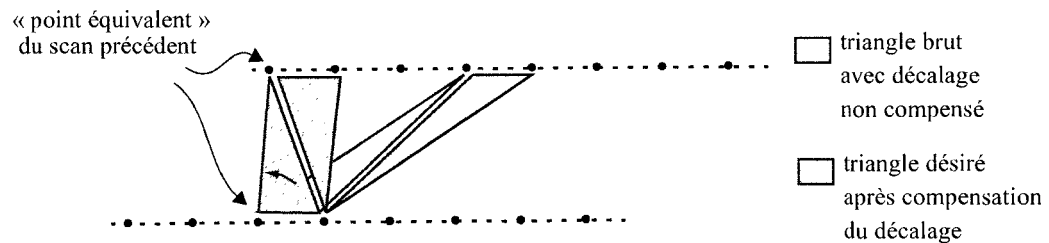


Figure 47 : Compensation du décalage transversal dans le maillage des triangles

La détection du décalage se fait au moyen de la distance entre tous les points du scans précédent et le point central du scan courant. L'indice de décalage n du point équivalent est choisi selon la différence de rayons présentant une distance minimale (voir figure 48).

Ce calcul et choix d'indice est répété pour chaque paire consécutive de scans.

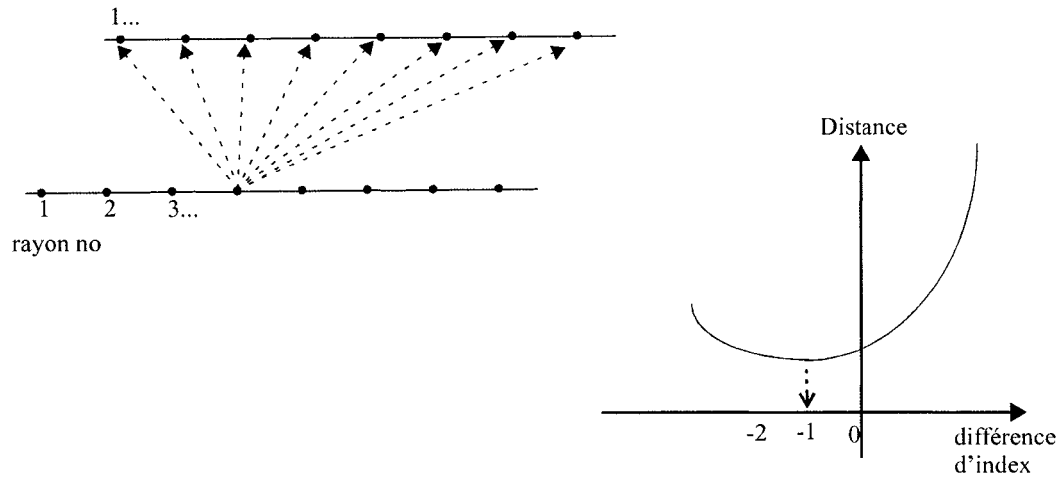


Figure 48 : Graphiques de distance inter-scan pour la sélection de l'indice de décalage

7.1.5 Connectivité par projection 2D

Une fois qu'il a été établi que les scans se chevauchaient, ce qui rend douteuse l'utilisation de la méthode de connectivité simple, il est encore possible que les données puissent être projetées sans rompre l'injectivité des informations sur un plan local. Il faut pour cela découper le balayage en groupes de profils s'intersectant mutuellement ou pas (voir figure 49). Les groupes n'offrant aucun chevauchement peuvent alors être confiés à la méthode de connectivité simple.

En ce qui concerne les groupes « croisés », la création d'un plan local formé par les scans et la trajectoire peut permettre la projection 2D servant de support à une triangulation de Delaunay 2D afin d'établir la connectivité des points 3D originaux (voir figure 50).

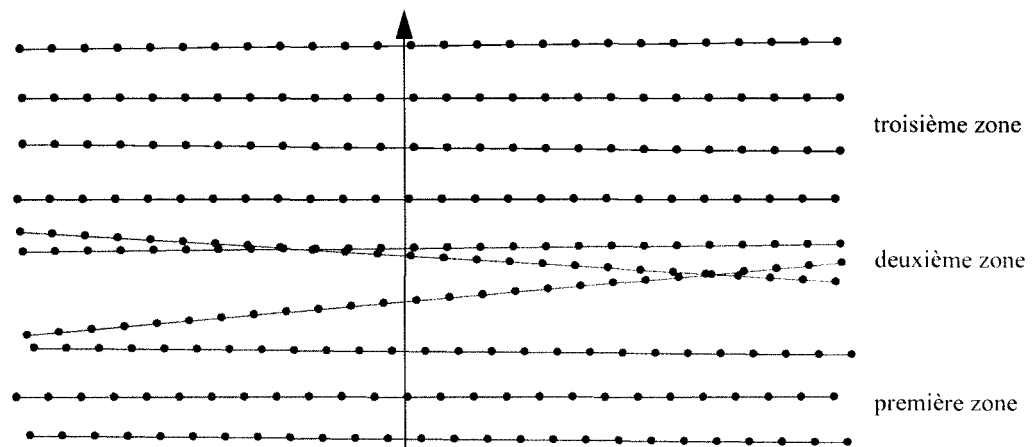


Figure 49 : Segmentation en zones de chevauchement local

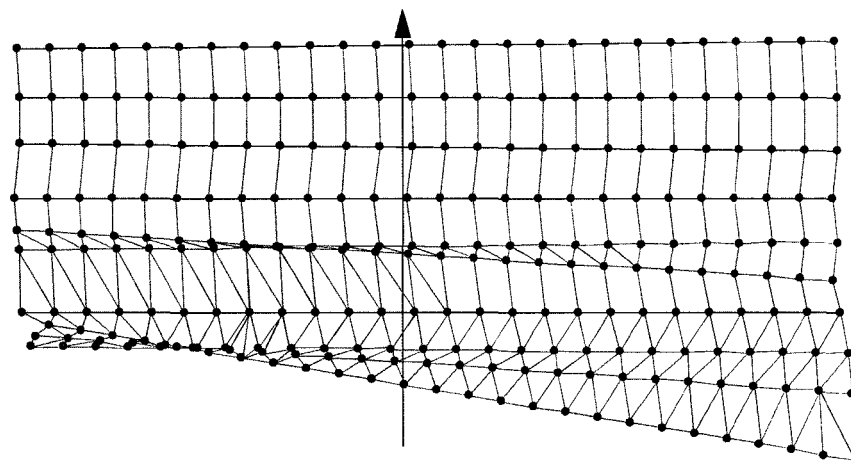


Figure 50 : Continuité correcte par projection 2D locale

7.1.6 Connectivité générale

Finalement, un algorithme plus puissant devra être utilisé pour assurer la reconstruction des données générales qui n'auront pas été récupérées par les deux premières. Dans ce cas, l'algorithme COCONE semble un bon choix.

Évidemment, ces tronçons de surfaces ne seront pas véritablement reconstruits en une seule surface suite à cette segmentation. Mais, en dédoublant les scans à la frontière de chaque zone au moment du découpage, la continuité visuelle sera respectée une fois la reconstruction achevée. Cette frontière commune pourra également servir de point de repère afin de les reconnecter par la suite, si désiré.

7.2 Développement algorithmique

La figure 8 du chapitre 1 a résumé le parcours suivi par les données sonar avant d'être transformées en surface 3D. Cette section du mémoire a donc pour but d'expliquer plus en détails les opérations mathématiques et informatiques nécessaires à ce processus, et dans quel module logiciel elles se trouvent (voir figure 51).

Le contenu du logiciel (TdB) et les sections du remplissage, de la segmentation et du filtrage de E3D ayant déjà été expliqués aux chapitres 3 et 4, ce qui suit passera en revue la fonction des modules d'accumulation des données, de validation des « faux points impulsionnels », de transfert des triangles issus du remplissage, de vérification de l'élongation excessive des triangles et de maillage VRML avant d'enchaîner avec les méthodes de connectivité des triangles aux chapitres 7.2.1 et 7.2.2.

Le module d'accumulation sert à stocker en mémoire les données en cours de balayage, ou en fichier selon les options de l'interface usager, en attendant que ce dernier choisisse une méthode de reconstruction. Le format de fichier développé est le reflet de ce qui se trouve

en mémoire : valeurs originales et celles résultant du filtrage impulsif, valeurs de précision et une valeur d'étiquette pour chaque donnée du profil.

La validation des triangles contenant de « faux impulsifs » consiste à vérifier pour chaque triangle s'il contient un ou des points qui auraient été étiquetés impulsifs :

- a. deux points impulsifs sont présents : il faut leur redonner leur valeur originale, en autant qu'ils respectent le critère de distance.
- b. trois points sont étiquetés impulsifs : alors le triangle est une surface normale correcte à laquelle il faut redonner les valeurs originales. En autant qu'ils respectent le critère de distance.

Le transfert des triangles au groupe de remplissage consiste simplement à vérifier pour chaque triangle s'il utilise un point étiqueté comme un trou.

La vérification de l'élongation des triangles se fait à l'aide du critère de complexité (voir chapitre 4.1). On peut démontrer que le rapport de l'aire sur le périmètre au carré peut être exprimé selon :

$$\frac{A}{P^2} = \frac{\tan\left[\frac{\pi(n-2)}{2n}\right]}{4n} \quad (1.2)$$

où,

A : aire du triangle

P : périmètre du triangle

n : facteur du nombre de côtés équivalents

Lorsqu'on trace la courbe de la partie de droite, elle apparaît strictement croissante de la valeur 2 (triangle isocèle) à la valeur 3 (triangle allongé). Elle peut donc très bien servir de critère d'élongation.

Le maillage VRML consiste à convertir les différents groupes de triangles résultants de la représentation interne (surface, triangles étirés, discontinuités, remplissage de trous et de « données 0 »), en collection de triangles et points au format de liste de coordonnées et d'index de connectivité des triangles d'un fichier VRML.

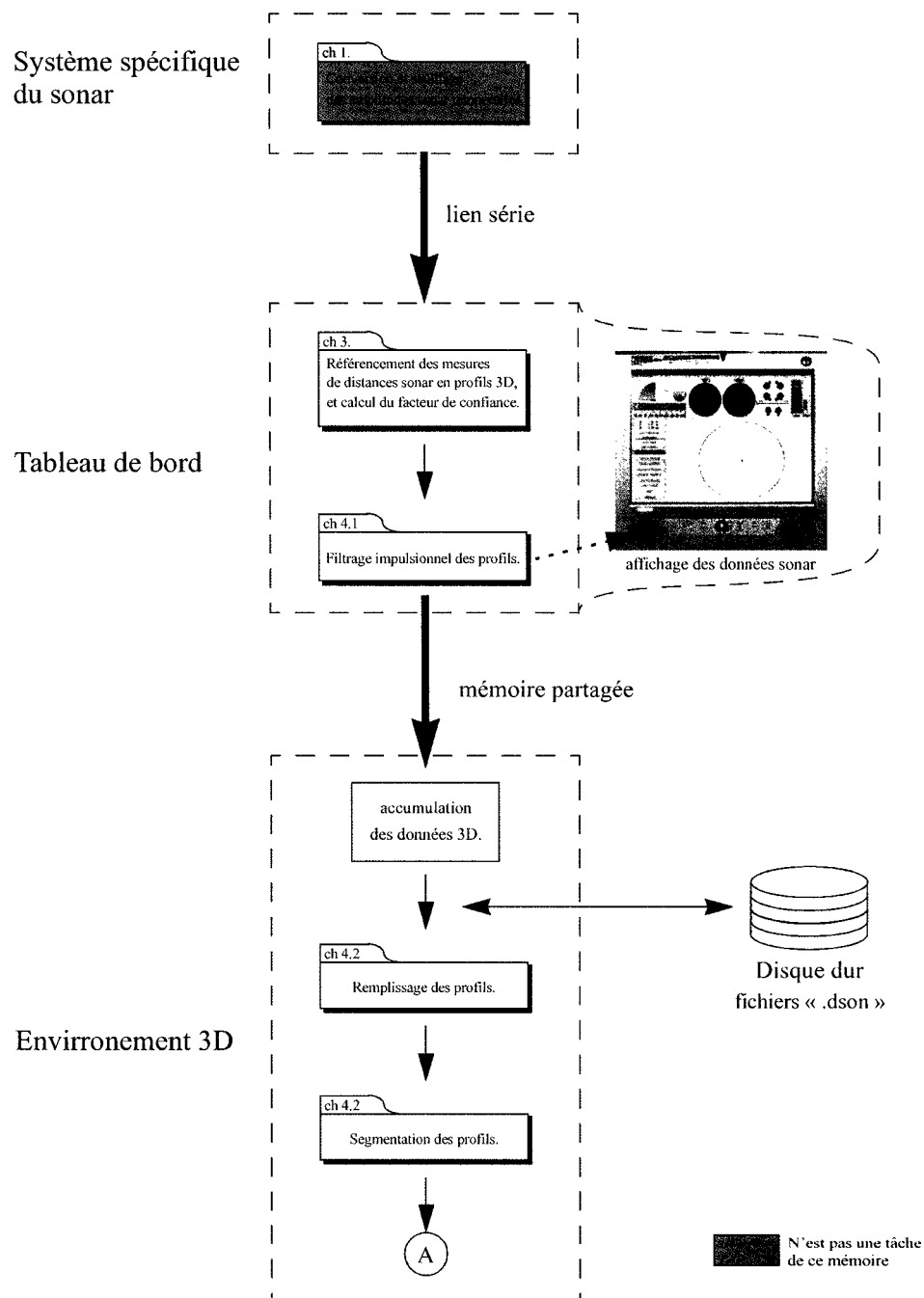


Figure 51 : Disposition des algorithmes dans les logiciels TdB et E3D

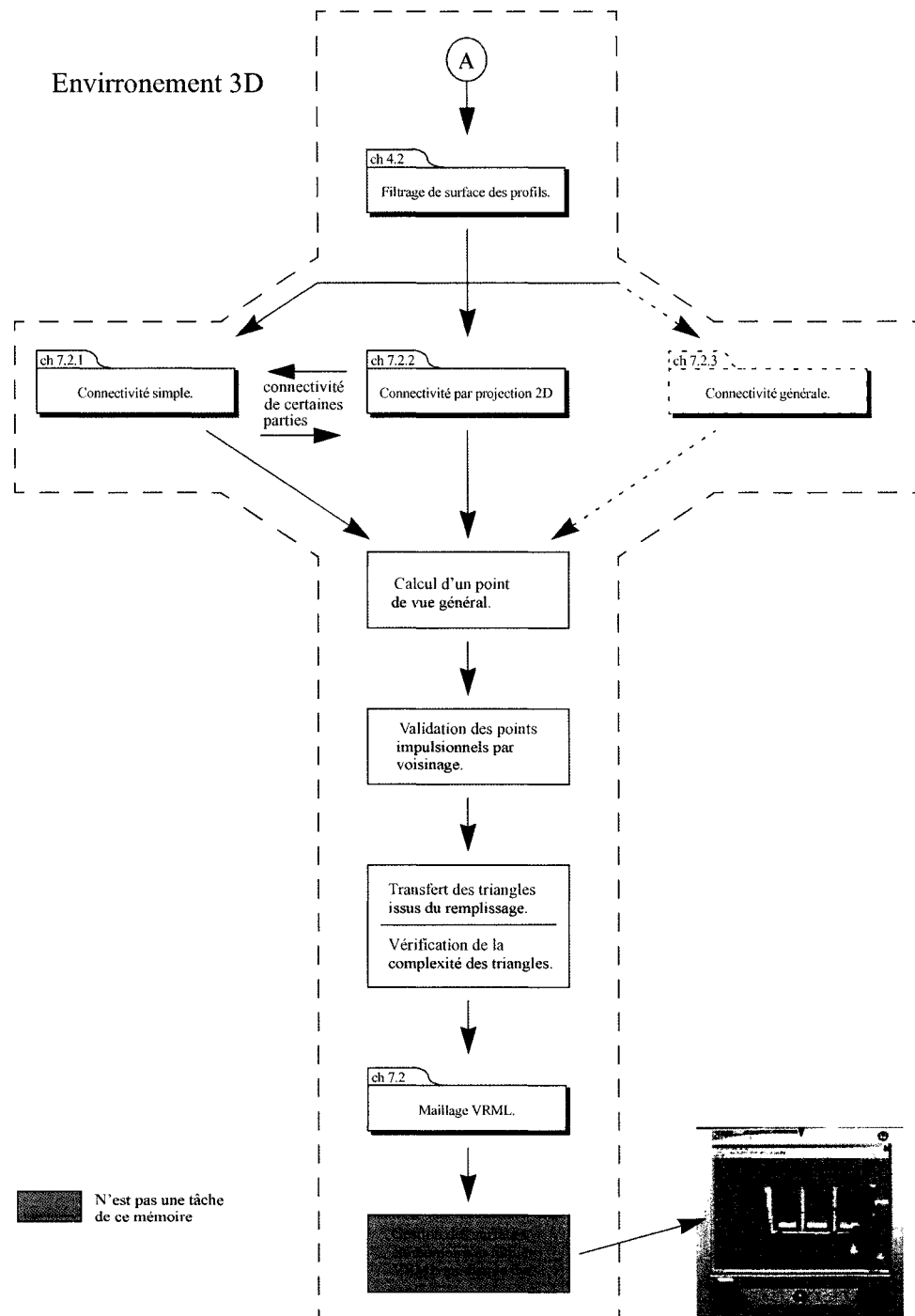


Figure 51 (suite) : Disposition des algorithmes dans les logiciels TdB et E3D

7.2.1 Algorithme de connectivité simple

L'algorithme de cette méthode est très simple et découle directement de sa description schématique (voir figure 52).

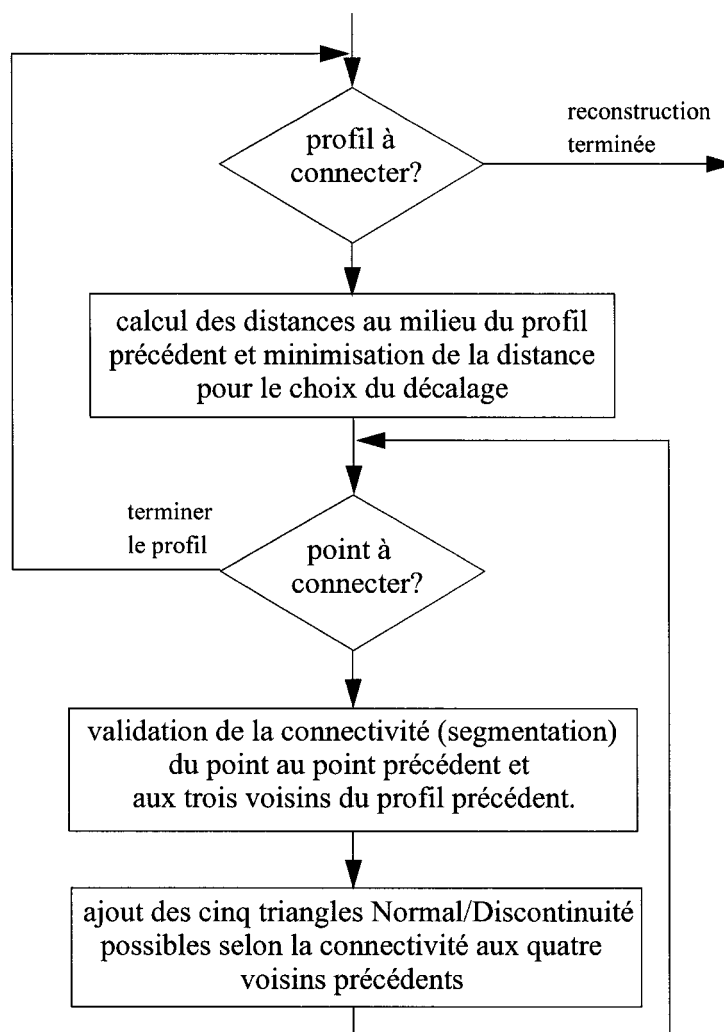


Figure 52 : Processus algorithmique de la connectivité simple

La connectivité au point précédent est simplement la comparaison des indices de segmentation déjà établis. La connectivité avec le point correspondant du profil précédent demande

la vérification du seuil de distance. Une fois que cette relation a été acceptée, la connectivité avec les voisins diagonaux est établie à l'aide des indices de segmentation de cette ligne. Lorsque l'indication de connectivité est installée, l'inverse d'une bonne connectivité veut surtout dire la mise en place d'un triangle de discontinuité.

Une fois toute la connectivité établie, on repasse au travers de la liste des points afin de générer les triangles correspondant selon les différents agencements possibles.

7.2.2 Algorithme par projection 2D

L'algorithme de cette méthode est un peu plus complexe, mais puisqu'il utilise les services de la connectivité simple, il reste aisée à représenter graphiquement.

La figure 53 montre comment un groupe de scans est transformé en une surface 3D. Ensuite, la figure 54 explique comment cette mise en connectivité est insérée dans le processus de vérification de l'intersection entre les profils.

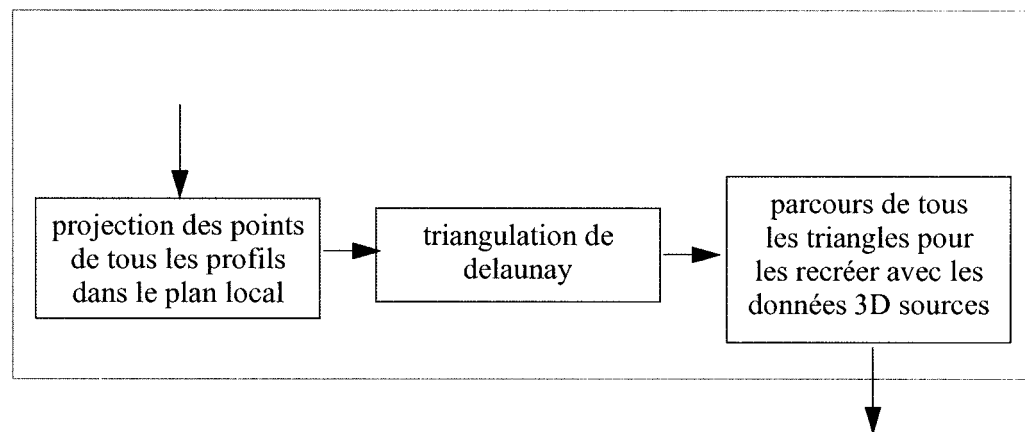


Figure 53 : Processus algorithmique de la connectivité par projection 2D

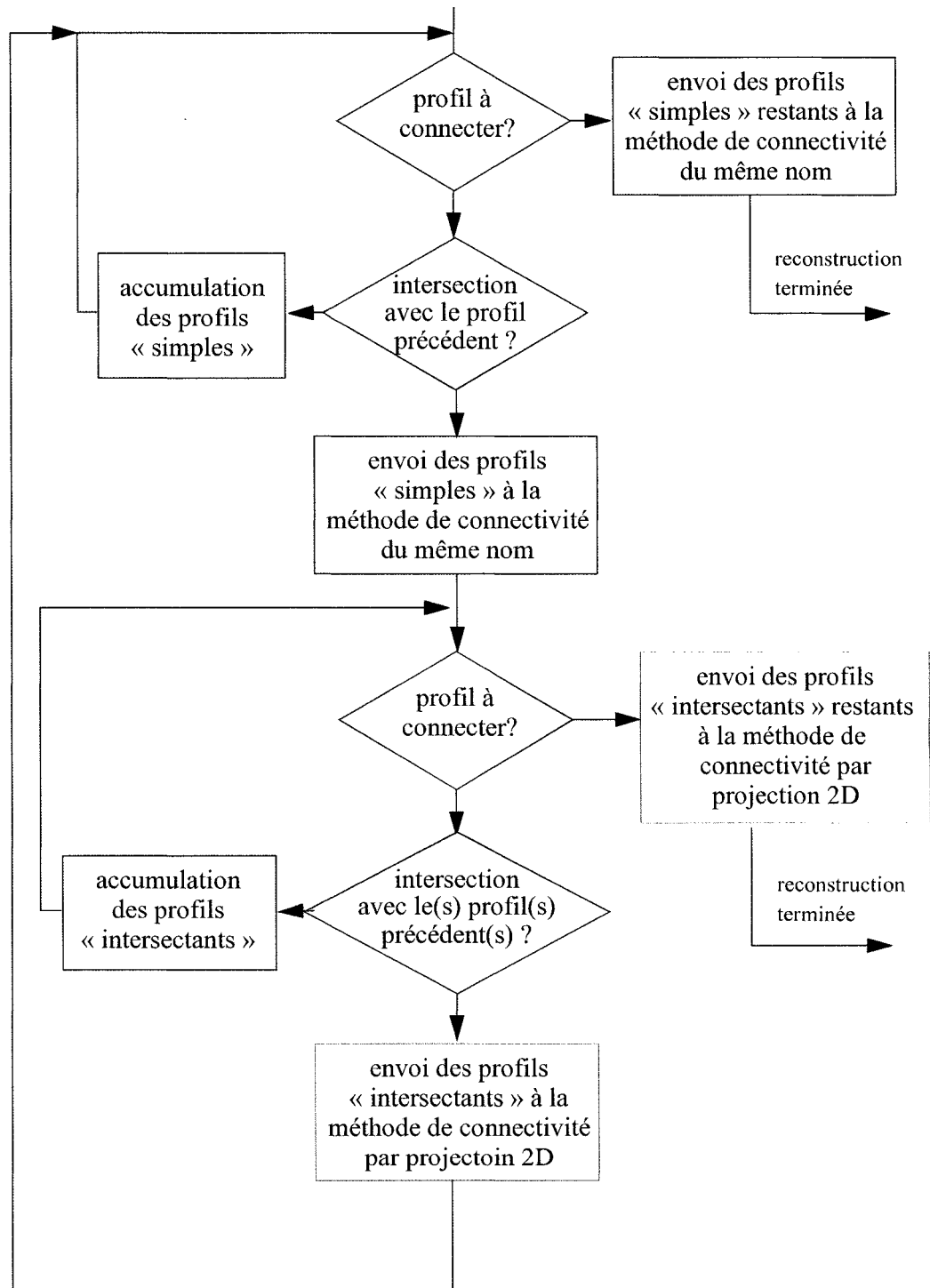


Figure 54 : Processus algorithmique complet de la connectivité par projection 2D

7.3 Discussion

Dans ce chapitre nous avons vu comment accumuler des scans sonar et assurer la connectivité entre les points 3D afin d'obtenir une surface correcte. Pour établir cette connectivité, trois méthodes ont été exposées afin de répondre au besoin d'efficacité du poste de commande du sous-marin. Ces trois méthodes se distingues par leur niveau de complexité et leur capacité à gérer le croisement des profils dans l'espace.

Principales contributions personnelle

La principale contribution a trait à la création d'un standard visuel de présentation des triangles dans le but de représenter graphiquement leur type. Cette attribution de couleurs aux différents groupes de triangles permet d'informer rapidement le pilote du sous-marin d'un besoin de balayages complémentaires en des endroits où une lacune géométrique est présente.

CHAPITRE 8

RECONSTRUCTION GLOBALE

Tous les éléments nécessaires à ce travail de recherche sont maintenant en place : prise de mesures référencées, filtrage impulsionnel et de surface, reconstruction des surfaces et génération de fichier VRML. Ce chapitre servira donc à montrer les résultats de reconstruction du processus de façon globale.

Dans un premier temps, quelques exemples de reconstruction à partir de données simulées bruitées, puis filtrées, permettront de comparer les conséquences sur la géométrie des deux types de bruits rencontrés.

La deuxième partie sera consacrée aux contre-exemples qui invalident les efforts de la méthode de connectivité simple et justifient l'utilisation de la méthode de connectivité par projection 2D. Pour ce faire, des données réelles obtenues à différents endroits seront utilisées.

8.1 Reconstruction par simulation bruitée

Le simulateur, dans sa configuration actuelle, ne peut générer de mesures acoustiques autrement que dans une orientation parfaitement horizontale. Ainsi, en autant que le pilote ne revienne pas sur ses pas, cette contrainte rend l'utilisation de la méthode de connectivité simple tout à fait naturelle. C'est pourquoi elle sera la seule utilisée dans cette première partie.

Simulation idéale

Afin de situer le lecteur dans le contexte du site du barrage LG2A qui sera utilisé dans cette partie du chapitre, une première simulation idéale est faite et le résultat de reconstruction montré à la figure 55. Dans chacun des fichiers VRML générés, une courbe rouge représente la trajectoire suivie par le sonar et des lignes vertes servent à mettre en évidence certains profils.

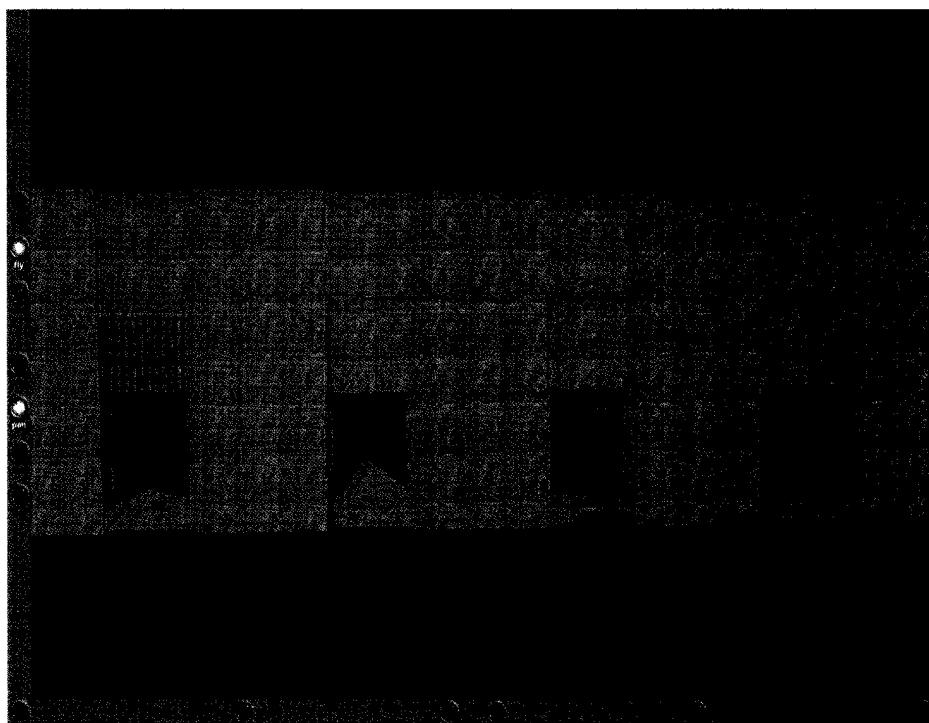


Figure 55 : Exemple de reconstruction idéale par la méthode de connectivité simple

Nous pouvons constater que la surface obtenue est très proche du modèle de barrage de référence. La figure 56 montre une vue rapprochée du bas de la deuxième bouches d'entrée d'eau avec une grille abaissée (à partir de la droite), afin de montrer les triangles générés par des monticules de débris inconnus dans les plans qui ont servi à créer le monde virtuel de référence.



Figure 56 : Vue à courte distance de l'entrée d'eau du milieu et des débris accumulés

Par contre, vue la grande proximité des surfaces, il est difficile de les distinguer dans les zones pratiquement identiques. Les figure 57 et 58 présentent maintenant une vue générale et en gros plan de la surface reconstruite affichée seule.

Par défaut, les fichiers VRML générés imposent une transparence de 50 % aux surfaces afin de faciliter leur superposition visuelle dans E3D. Ainsi, la figure 58 nous montre la forme de la prolongation interne de deux des entrées d'eau à travers la surface voisine. Par contre, lorsque visualisée seule, la surface a plutôt avantage à être complètement opaque. Les figures 59 et 60 sont donc des versions opaques des figures 57 et 58. Finalement, la figure 57 comporte dans le haut trois bâtonnets. Ces trois pointes sont en fait les trois balises du système de localisation acoustique qui flottent proche de la surface.

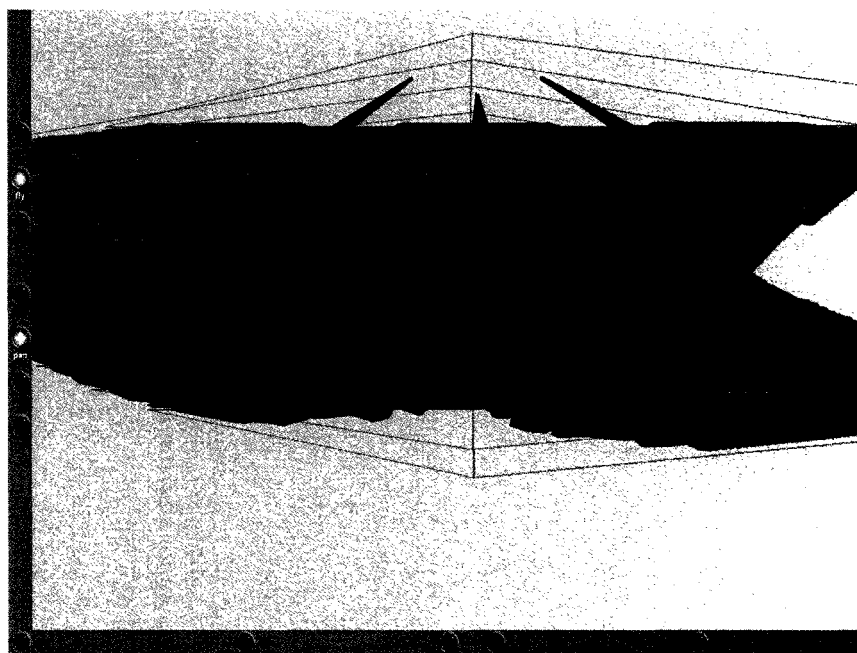


Figure 57 : Vue générale de la surface reconstruite seule

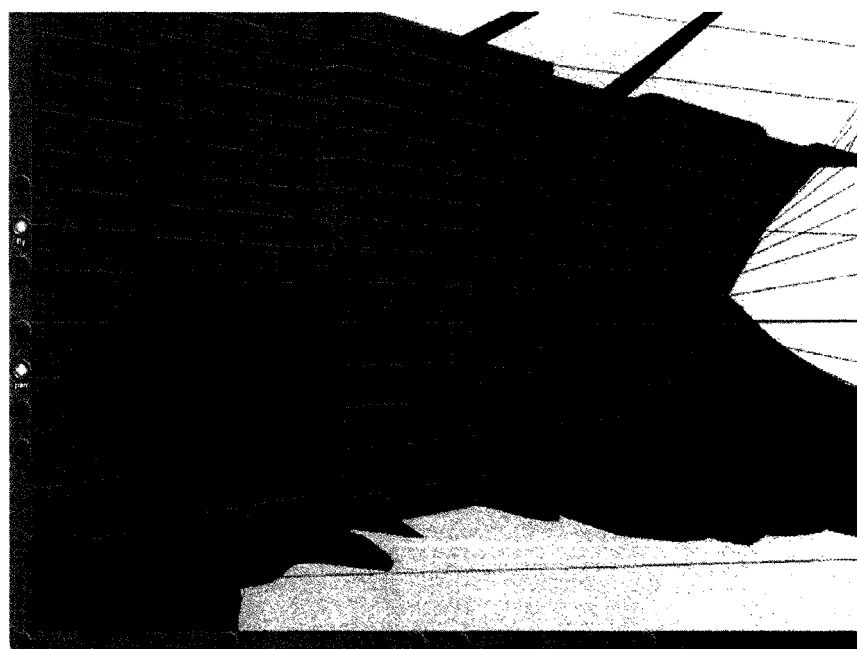


Figure 58 : Vue opaque à courte distance de la surface reconstruite seule

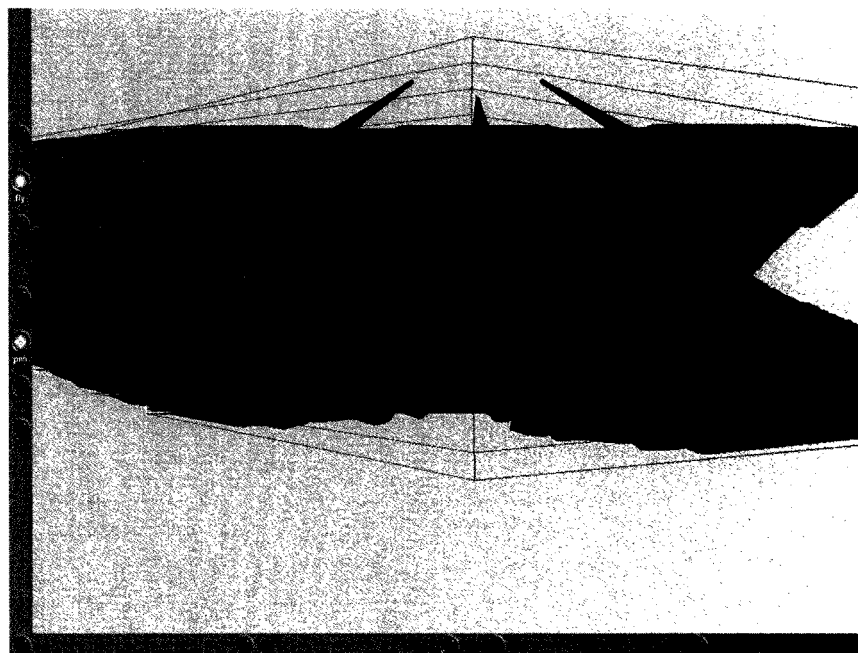


Figure 59 : Vue opaque de la surface reconstruite seule

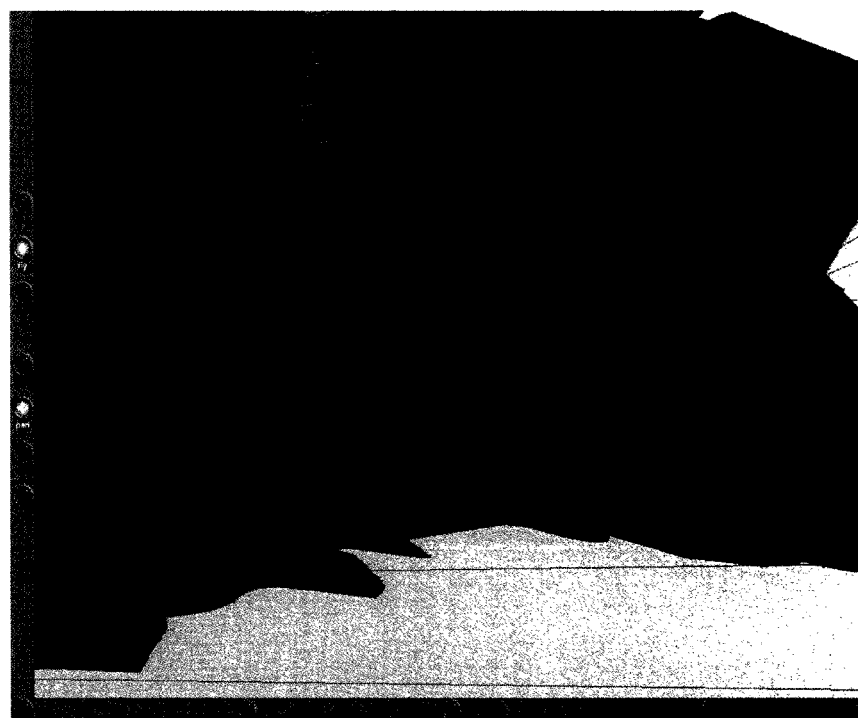


Figure 60 : Vue opaque à courte distance de la surface reconstruite seule

La figure 61 nous montre finalement le maillage entre les points 3D, en plus de la surface, en créant un double de la géométrie de la figure 60 et en la reliant par des segments au lieu de triangles pleins.

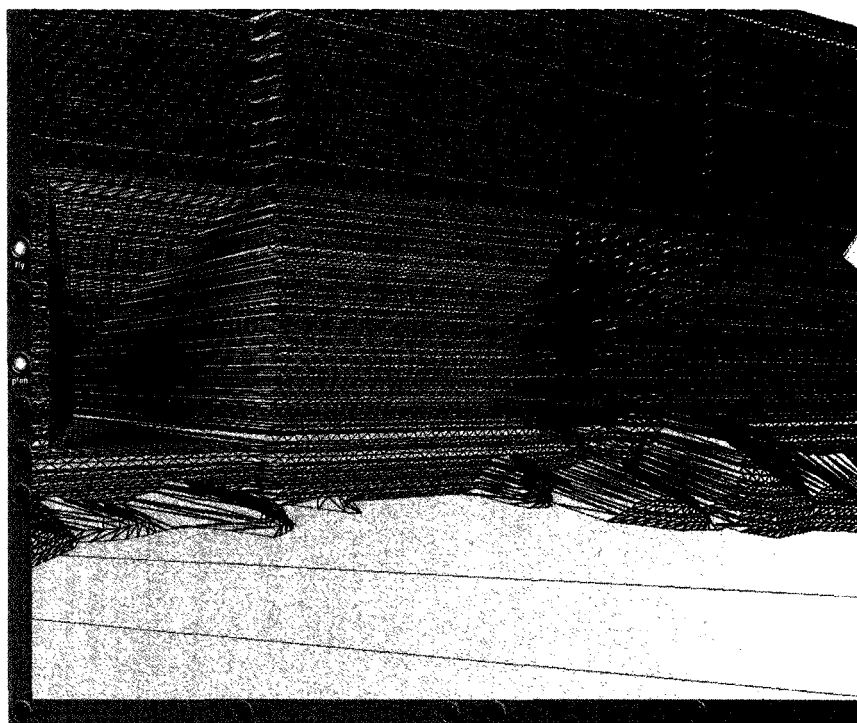


Figure 61 : Vue à courte distance et opaque de la surface avec présentation de ses segments de triangle

Simulation bruitée sans filtrage

Maintenant, nous allons ajouter un soupçon de bruits impulsif et de surface. La figure 62 est une vue d'ensemble de la reconstruction obtenue. Nous constatons que nous ne pouvons rien y distinguer tellement le bruit impulsif prend toute la place.

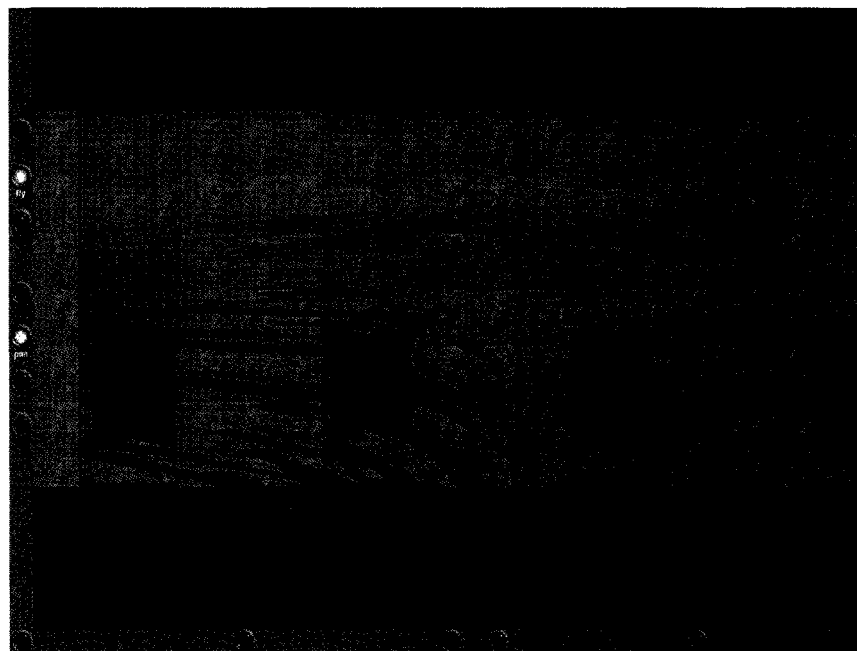


Figure 62 : Reconstruction avec bruit impulsionnel et de surface
mais sans filtrage

Simulation bruitée avec filtrage impulsionnel

Nous allons maintenant appliquer le filtrage impulsionnel par médian tronqué afin de réduire au maximum la présence résiduelle du bruit impulsionnel (voir figure 63).

Nous remarquons que les pointes encore présentes sont beaucoup moins nombreuses, et que leurs triangles ont été classés comme discontinuités. Malheureusement, nous avons aussi perdu la pointe de la balise du milieu à cause d'une trop faible quantité de mesures la décrivant.

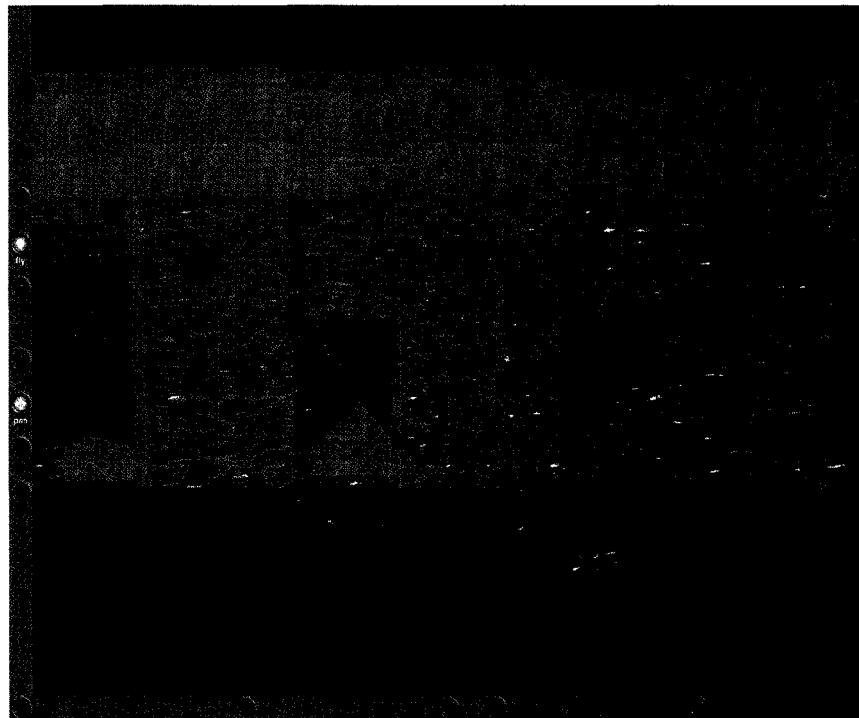


Figure 63 : Vue générale d'une surface reconstruite avec filtrage impulsif

La classification en discontinuités de ces points résiduels veut dire que si nous assignons une transparence complète à leur groupe, nous les verrons disparaître au profit de trous dans la surface, comme à la figure 64. Seules les surfaces réelles seront présentes, y compris les quelques triangles des surfaces issues de « faux impulsifs » conservés et flottants dans les airs.

Les triangles issus de bruit impulsif correctement éliminés sont en plus grand nombre. Nous pouvons les voir en jaune un peu partout sur la surface de la figure 65. Finalement, deux facteurs de bruit de surface ont été utilisés durant la simulation : $1x+0$ pour la moitié du bas, et $1,3x+0$ pour celle du haut. La figure 66 met en évidence la différence entre les deux.

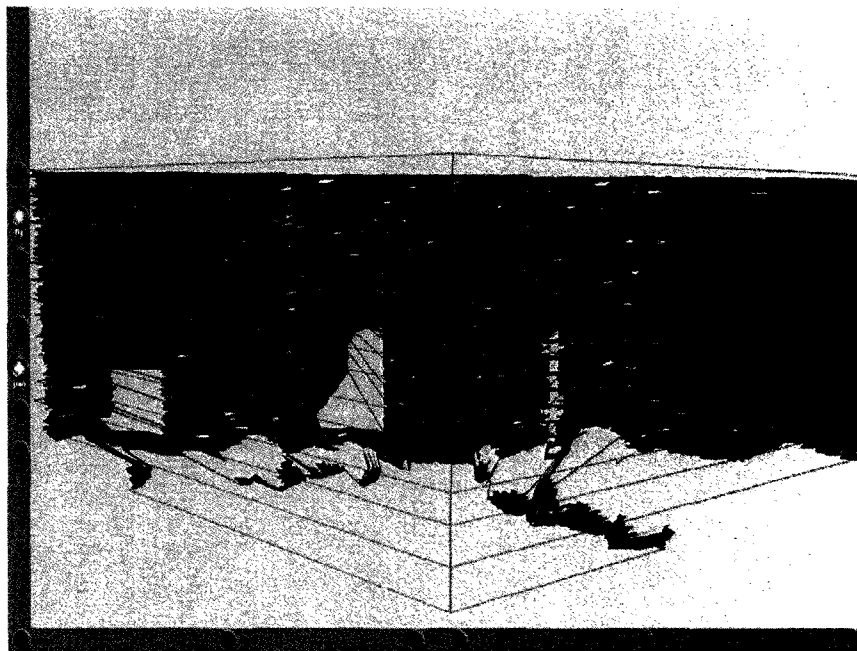


Figure 64 : Trous laissés dans la surface par la transparence des triangles classés comme discontinuités



Figure 65 : Vue à courte distance de la surface avec filtrage impulsif

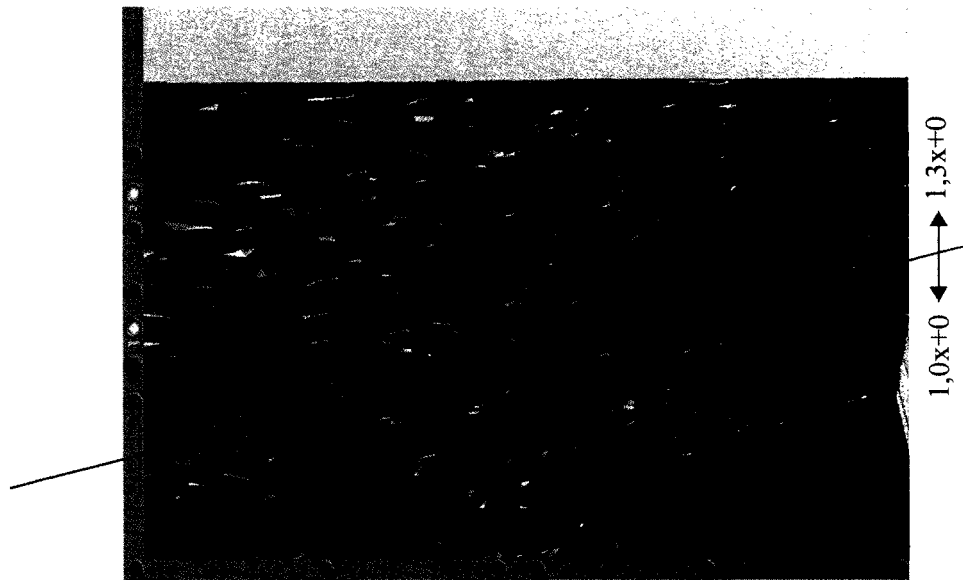


Figure 66 : Variation du facteur de bruit de surface lors de la simulation

Simulation bruitée avec filtrages impulsif et de surface

Grâce au filtrage de surface, nous obtenons maintenant une surface proche de l'originale idéale (voir figure 67).

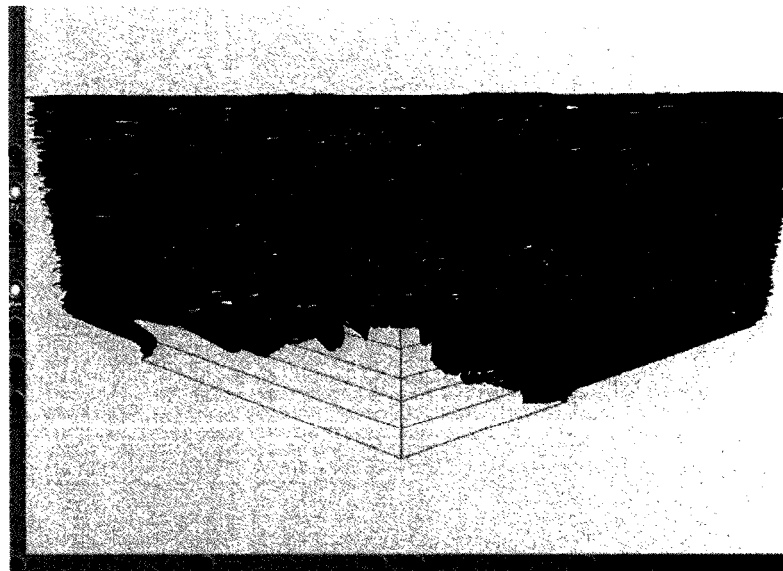


Figure 67 : Résultat avec filtrages impulsif et de surface

8.2 Reconstruction de données réelles

Maintenant que les fonctionnalités de connectivité simple et d'identification des lacunes géométriques par code de couleurs ont été explorées, nous allons réaliser de nouvelles reconstructions de balayages réels obtenus au bassin de la ville de St-Bruno et au quai Bikerdike du port de Montréal.

Bassin St-Bruno

Plusieurs balayages ont été effectués à l'aide d'une barge sur laquelle était fixé le sonar, pointé vers le fond. Dans chacun des fichiers VRML générés, la ligne rouge représentant la trajectoire suivie par le sonar nous montre que certains de ces balayages ont été faits en ligne droite, et d'autres avec un certain nombre de virages en chemin (voir figure 68 à 74).

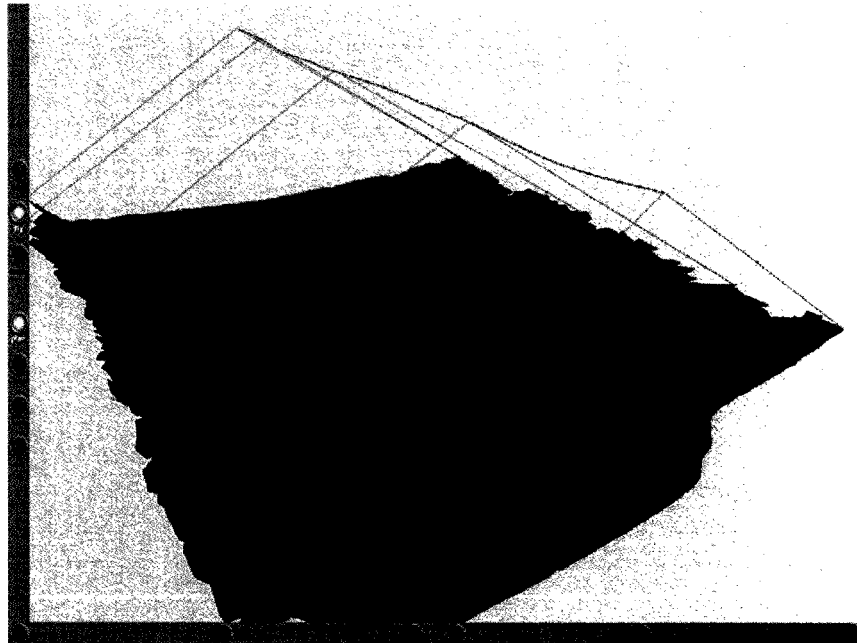


Figure 68 : Premier balayage du fond du bassin de St-Bruno

Cette surface semble avoir été correctement reconstruite à l'aide de la méthode simple, mais en réalité certain profils s'entrecroisent. Nous pouvons le constater par la présence d'une section discontinue faisant toute la largeur de la surface. La méthode de connectivité par projection 2D a été conçue pour détecter ces croisements et compenser la géométrie locale par une triangulation de Delaunay. La figure 69 montre le résultat avec des bandes de couleur alternées, correspondant aux regroupement des profils.

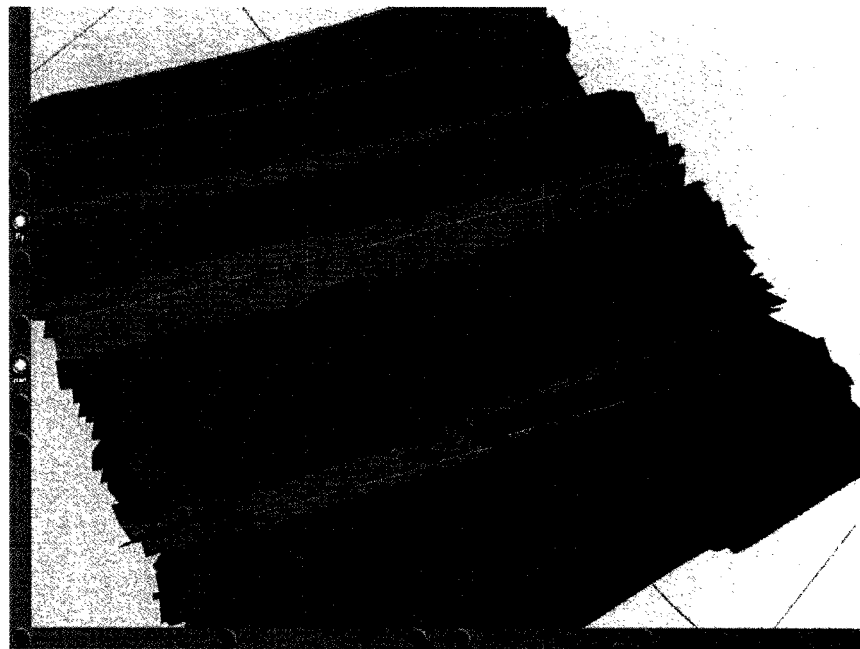


Figure 69 : Premier balayage du fond du bassin de St-Bruno avec connectivité par projection 2D

Voici quelques autres exemples de reconstruction à partir de mesures prises au bassin de St-Bruno (figures 70 à 72).

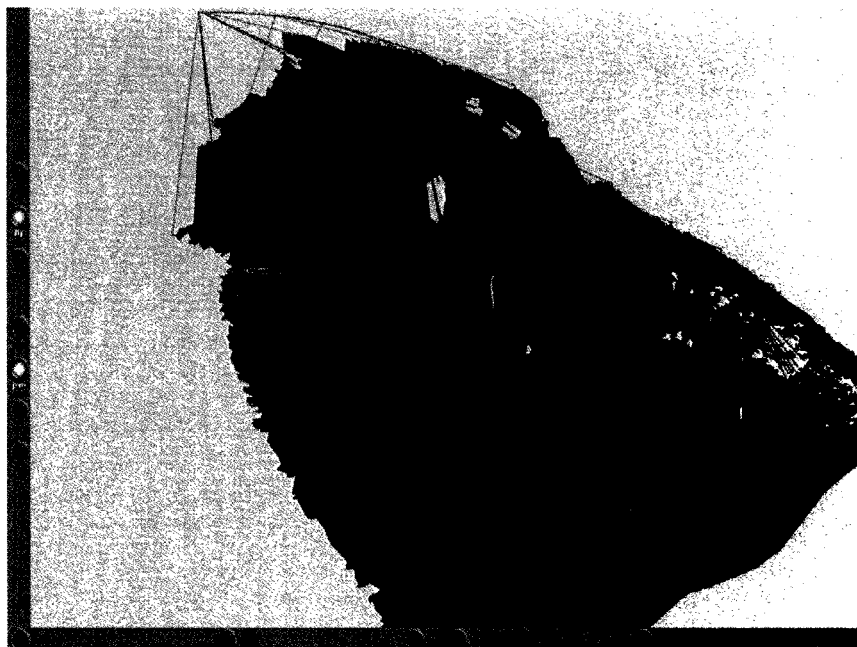


Figure 70 : Deuxième balayage du bassin de St-Bruno par connectivité simple



Figure 71 : Deuxième balayage reconstruit avec connectivité par projection 2D

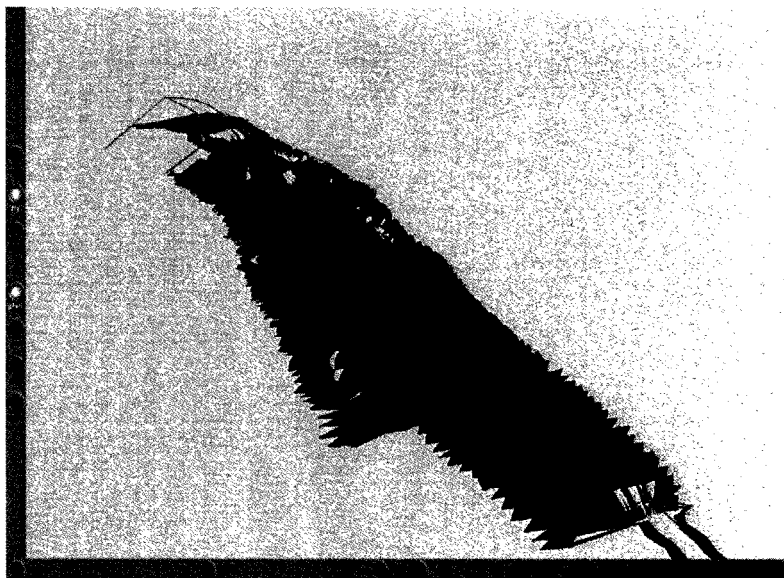


Figure 72 : Troisième balayage du fond du bassin de St-Bruno

Nous pouvons voir, dans les figures 73 et 74, qu'à de multiples endroits des chevauchements locaux ont résulté en des triangles obtenus par Delaunay, mais que dans les sections courbes de la trajectoire, des profils viennent rejoindre des scans précédents. Ceci est un exemple de superposition distante qui ne peut être éliminée par la reconstruction seule mais plutôt à l'étape de l'unification.

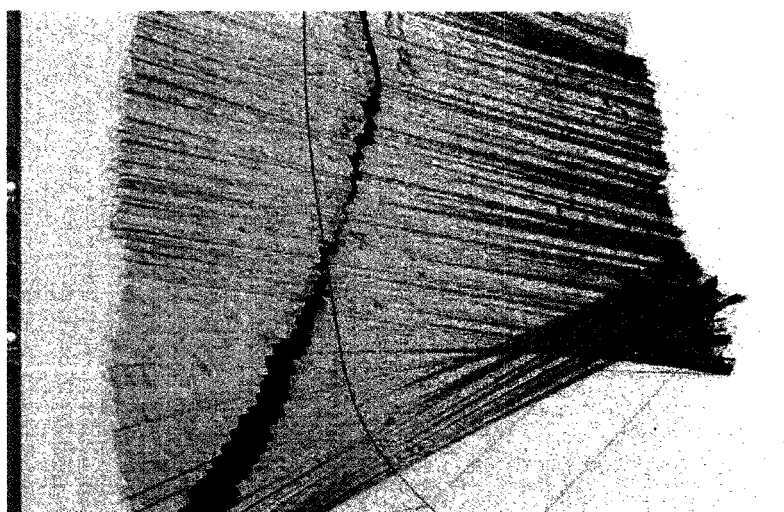


Figure 73 : Quatrième balayage du fond du bassin de St-Bruno

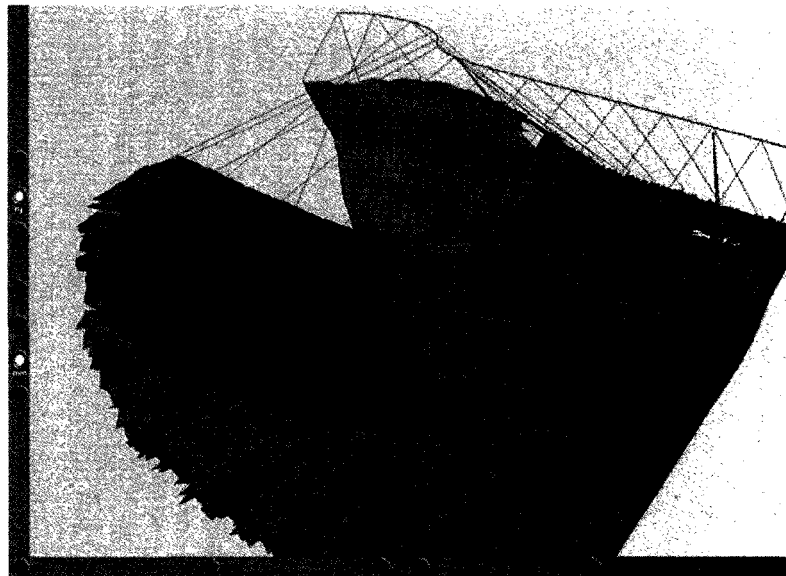


Figure 74 : Cinquième balayage du fond du bassin de St-Bruno

Quai Bickerdike du port de Montréal

La photo 7 a été prise le 28 juillet au bord du quai.



Photo 7 : Photo du quai Bickerdike du port de Montréal

Voici la représentation de référence du quai (figure 75) :

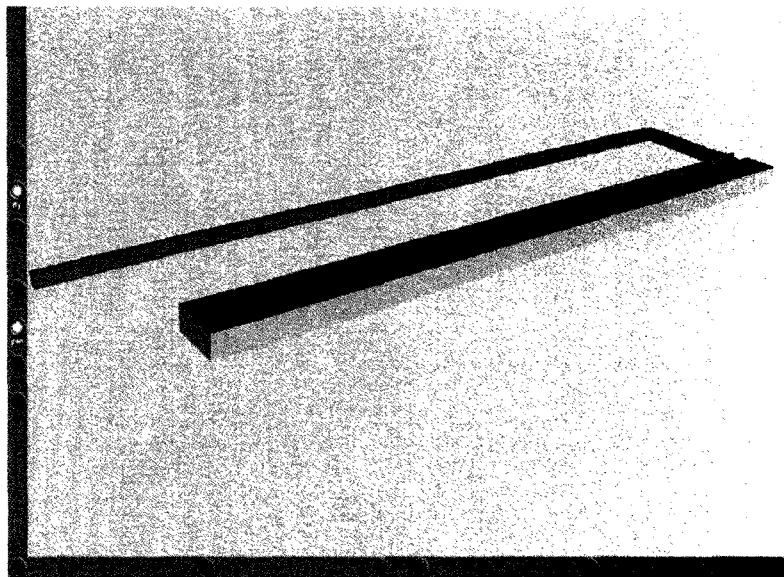


Figure 75 : Représentation virtuelle de référence du quai Bickerdike

Voici maintenant quelques balayages effectués pour reconstruire les parois du quai :

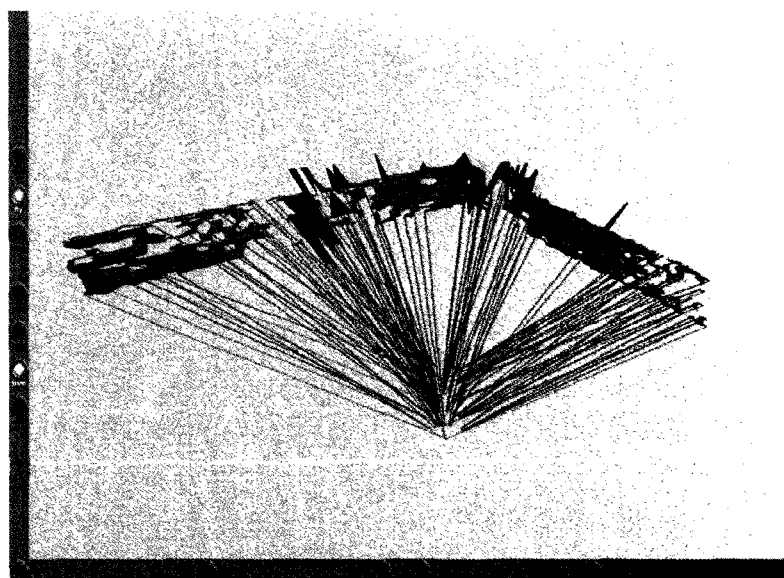


Figure 76 : Premier balayage du quai Bickerdike

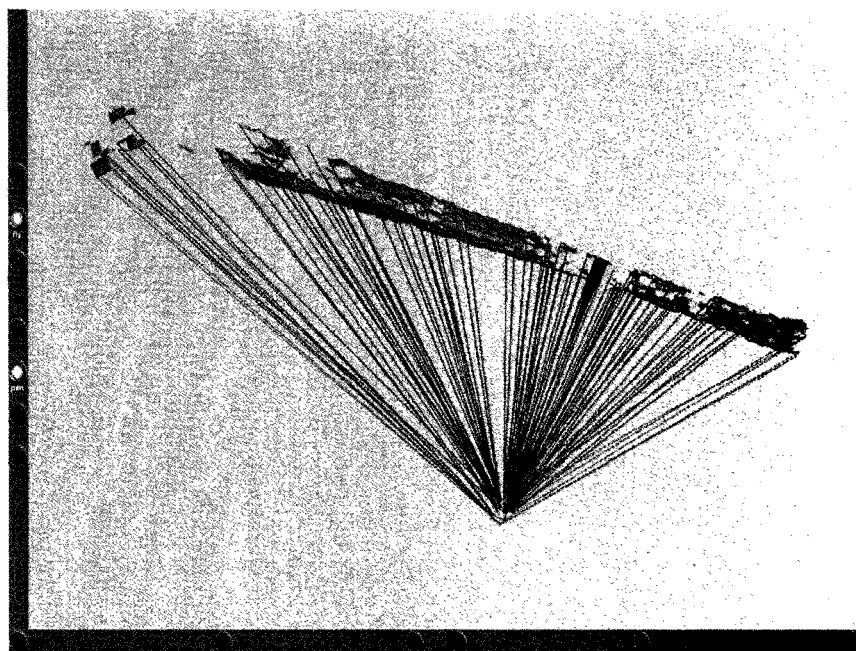


Figure 77 : Deuxième balayage du quai Bickerdike

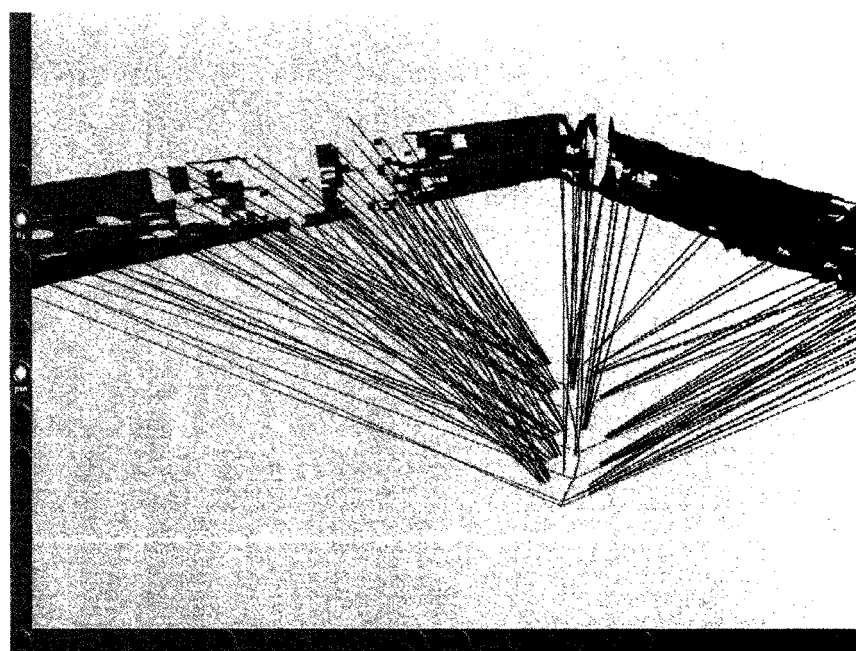


Figure 78 : Troisième balayage du quai Bickerdike

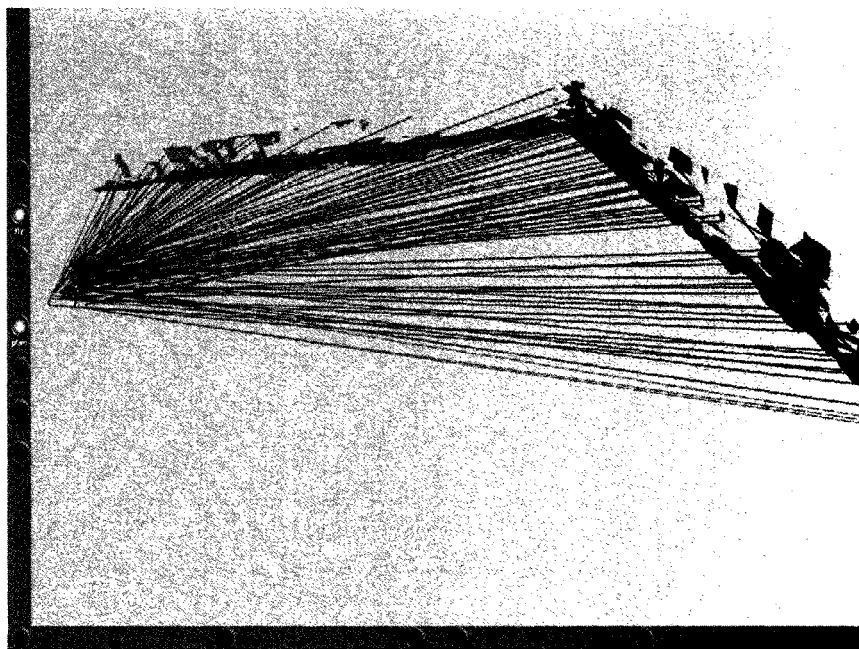


Figure 79 : Quatrième balayage du quai Bickerdike

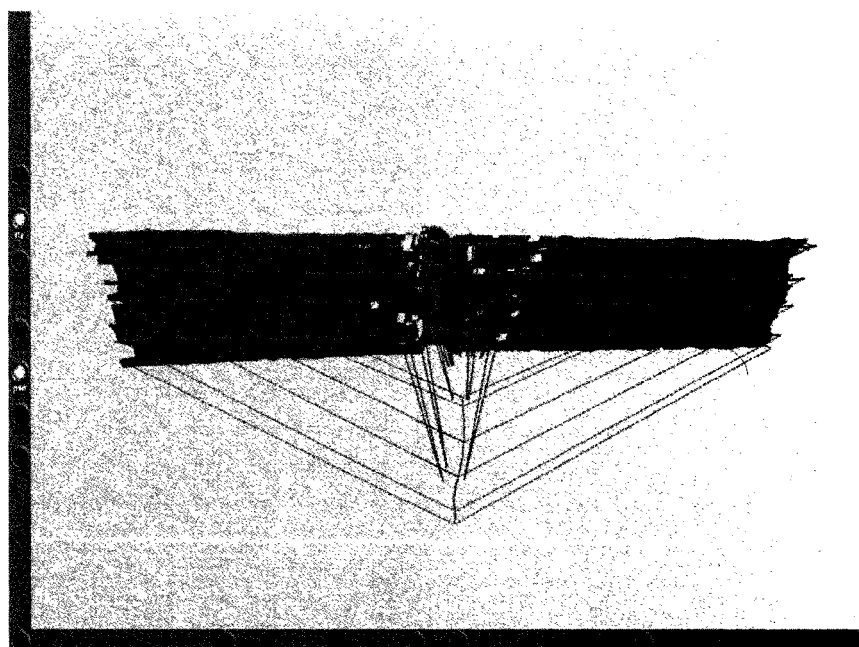


Figure 80 : Cinquième balayage du quai Bickerdike

On remarque qu'une encoche est visible dans la surface du mur reconstruite, mais que celle-ci n'était pas présente dans le modèle de référence.

Voici finalement une image obtenue en superposant certaines des surfaces reconstruites afin d'évaluer leur décalage mutuel (figure 81).

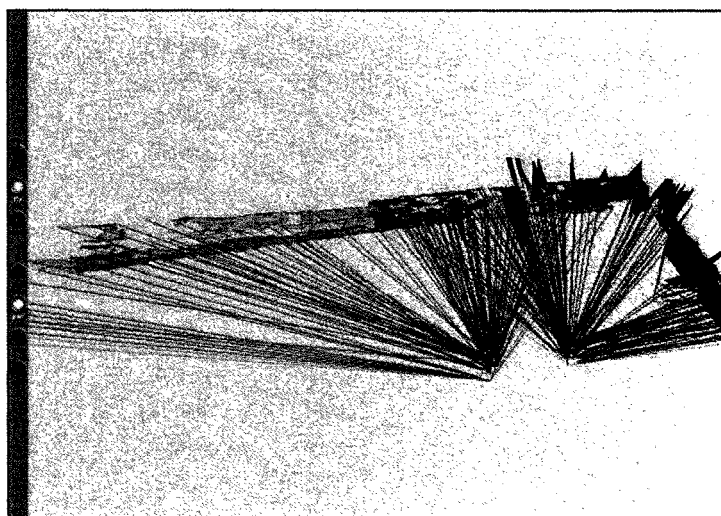


Figure 81 : Superposition visuelle de plusieurs surfaces reconstruites du quai Bickerdike

8.3 Discussion

Dans ce chapitre nous avons commencé par démontrer la fonction de représentation graphique des lacunes géométriques. Nous avons ensuite utilisé les techniques de reconstructions étudiées afin de produire des exemples par simulation et données réelles.

CHAPITRE 9

UNIFICATION DE SURFACES

On peut distinguer deux méthodes d'unification de surfaces qui soient particulièrement applicables à ce projet de recherche : la méthode surfacique par diagramme de Venn et la méthode utilisant la représentation implicite à partir d'une surface déjà reconstruite. Les raisons qui font que ces deux méthodes sont spécialement pertinentes ont été expliquées au chapitre 6.2.2. Celui-ci se concentrera plutôt sur les modifications et les ajouts qu'il faudrait apporter à la librairie de reconstruction, telle qu'elle a été développée jusqu'à maintenant, afin de la rendre compatible avec l'une ou l'autre de ces méthodes.

La plus importante considération concerne le principe même d'unification utilisé par les deux méthodes : le calcul d'une valeur unique à partir des informations associées des unités de surfaces superposées. Dans les deux cas, une moyenne est utilisée pour obtenir cette valeur unique. Les auteurs de ces deux méthodes font également la suggestion que des poids non-uniformes puissent être ajoutés aux valeurs sources afin de donner priorité à celle offrant la meilleure condition de précision. Cette attribution de valeurs d'importance est compatible avec la précision totale des mesures sonar référencées et permettrait d'améliorer la précision d'une section de la surface globale en lui adjoignant un nouveau balayage de meilleure qualité, obtenu plus près de la surface par exemple.

Pour simplifier l'usage de ce poids, il serait utile que sa valeur débute à 1 et diminue vers 0 avec une perte de précision *relative aux autres membres* de sa cellule d'unification. Pour réaliser cette diminution relative, nous pouvons normaliser l'inverse de la précision des candidats présents de façon à réduire le coefficient en fonction de la réduction de la précision, i.e. en fonction de l'augmentation de la valeur de cette précision :

$$p_{ri} = \frac{1/p_{ti}}{\sum_i 1/p_{ti}} \quad (3.3)$$

où :

p_{ri} : indice de précision relative de la donnée à unifier

p_{ti} : indice de précision totale de la donnée sonar référencée

Un autre point commun, mentionné dans l'introduction de cette partie, concerne la nécessité d'avoir les différents groupes de données sous forme de surfaces déjà reconstruites. En effet, les deux techniques ont été développées dans le but d'unifier des images de profondeur. Ce type d'information rend la reconstruction initiale aisée (essentiellement la méthode de reconstruction simple décrite au chapitre 7.1.4), puisque la superposition de points est impossible.

Une dernière caractéristique commune est que, peu importe l'imprécision introduite par les facteurs acoustiques de l'indice de qualité, la précision du système de mesure peut être améliorée à l'aide d'une technique de rapprochement des surfaces elles-mêmes. Par exemple, l'« *itérative closest point* » (ICP), voir Besl [59] ou Gagnon [60]. En effet, il est possible de détecter la ressemblance entre deux géométries et de calculer une matrice de translation/rotation les rapprochant au mieux et ainsi réduire l'importance de l'imprécision du système de positionnement quand les circonstances sont favorables.

Nous allons maintenant voir les considérations supplémentaires spécifiques à chacune des méthodes proposées.

9.1 Méthode surfacique par diagramme de Venn

Un effet secondaire intéressant de cette méthode est qu'elle est capable de gérer la superposition distante sans préparation supplémentaire des surfaces reconstruites. En effet, la première étape consiste à segmenter les surfaces en morceaux superposés afin de construire le diagramme de Venn. Il est donc très probable qu'elle ne s'inquiète pas, durant son traitement, de savoir si deux morceaux visibles du même point de vue appartiennent également à la même surface lorsqu'ils lui sont présentés sous forme détachée.

9.2 Méthode implicite

Un seul aspect du processus complet de la reconstruction/unification de surfaces à partir de données semi-structurées n'est pas supporté par l'unification implicite : la réduction de redondance de la superposition distante. En effet, il avait été expliqué dans l'énonciation des problématiques de cette partie que ce type de superposition était difficile à détecter et à traiter à l'étape de la reconstruction. De ce fait, elle avait été relégué à l'étape de l'unification. Le problème avec cette méthode d'unification vient de la conversion de la surface en mode implicite : la distance la plus *courte* est utilisée en tous points de la grille. Ainsi, si une surface était composée de triangles appartenant en réalité à la même zone de surface de l'objet réel, la valeur d'un seul de ces triangles serait utilisée et l'information des autres triangles serait négligée. Sans parler qu'en différents points de la grille, et considérant l'influence du bruit sur les données originales, différents triangles seraient probablement concernés. Il faut donc s'assurer que la segmentation de la surface en différents morceaux ne souffre pas de ce problème (voir chapitre 7.1.5).

Il serait également intéressant de réaliser une étude sur la taille des cellules de la grille globale, tel que fait par Fournier [61]. Cette résolution est directement responsable de la taille des triangles générés à l'étape finale de polygonisation et de la finesse des détails que ceux-ci peuvent représenter.

9.3 Discussion

Nous avons vu dans ce chapitre deux méthodes d'unification de surface qui, après de petites modifications, pourraient servir dans le cadre de la continuité de ce projet.

Cependant, dans l'esprit de continuité de ce projet de recherche, ma recommandation pour une méthode particulière irait à l'unification par représentation implicite. En plus d'être complètement compatible avec le principe de moyennage par importance relative des unités de surface, cette méthode présente l'avantage de comporter peu d'étapes dans son processus d'unification. Celles-ci sont suffisamment simples pour implémentation aisée et efficace. Également, cette méthode est supportée par un grand nombre de documentation de référence dans la littérature.

Principale contribution personnelle

La principale contribution apportée dans ce chapitre est l'élaboration d'une stratégie de conversion des différentes valeurs d'imprécision des surfaces en une valeur de poids compatible avec le processus de moyennage par importance relative des unités de surfaces à unifier.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire présente les différentes étapes du processus de reconstruction 3D par sonar d'environnements sous-marins :

- a. l'accumulation de profils par balayages de l'environnement immédiat du véhicule;
- b. le référencement 3D de ces données sonar;
- c. le filtrage des données brutes;
- d. la reconstruction en surfaces individuelles des balayages;
- e. l'unification de ces éléments partiels en une surface globale.

Bien que la dernière étape d'unification n'ait pas été implantée, une recommandation de la méthode à utiliser a été faite afin de faciliter la continuité du projet. Par contre, les résultats de reconstruction à eux seuls sont valables et pourraient être utilisés tels quels.

La première partie consistait à résumer les conditions théoriques de propagation acoustique dans l'eau, afin de justifier une méthode de filtrage des données brutes et d'expliquer le processus de référencement 3D des informations obtenues. Un engin de simulation sonar a également été conçu pour permettre la validation de cette première partie du processus global de reconstruction.

Le module de reconstruction de la deuxième partie permet d'établir la connectivité des points 3D individuels de chaque balayage et ainsi de créer une surface 3D pour chacun. Il a également la capacité de générer des éléments de triangulation indépendants montrant les différents types de lacunes géométriques des surfaces reconstruites. Ces éléments servent d'indication locale d'un besoin de balayage complémentaire afin de couvrir adéquatement et complètement toutes les surfaces d'un site de barrage hydro-électrique.

Le simulateur sonar fait partie d'un poste d'entraînement du sous-marin d'inspection qui permet, entre autres, de recréer les conditions d'opération du système et de tester tous le processus d'accumulation/reconstruction des données sonar. Grâce à lui, des exemples de séances de reconstruction de sites virtuels ont été proposés en démonstration. Également, des données réelles ont été prises sur le terrain et ces résultats de reconstruction ont été comparés à ceux obtenus par simulation. D'ailleurs, l'une de ces comparaisons est un exemple concret d'une modélisation incomplète d'un site dont les différences ont été révélées par les mesures effectuées.

Finalement, tous ces essais montrent bien l'intérêt de continuer à développer cette capacité de reconstruction de surfaces pour le système d'inspection de barrages par sous-marin télé-opéré et, en particulier, de terminer l'implantation de la capacité d'unification des surfaces obtenues.

RECOMMANDATIONS

Voici une liste d'améliorations possibles et de recommandations qui pourraient être utiles pour la continuité de ce projet.

Mesures sonar référencées

Il serait grandement profitable d'installer un vélocimètre sur le sous-marin. Une mesure locale et instantanée de la vitesse du son au moment de la prise de mesure permettrait d'ajuster les paramètres du sonar et des calculs de référencement des mesures avec une information toujours juste durant les balayages.

Afin d'améliorer la précision des mesures sonar brutes, il serait nécessaire de connaître en tous points de l'environnement (position X-Y et profondeur Z) la vitesse du son afin de pouvoir calculer pour chaque rayon de chaque scan une estimation fiable de sa trajectoire réelle. Cette information permettrait de connaître la distance réelle parcourue et la valeur d'un delta de profondeur (en supposant un sonar installé à l'horizontal) du point de contact à l'objet. Malheureusement, il est impensable de faire toutes ces mesures. Au mieux pourrait-on effectuer un échantillonnage à de multiples profondeurs pour une position X-Y fixe, autrement dit la courbe de vitesse d'une colonne d'eau. Ainsi, une approximation acceptable serait qu'en supposant ce profil identique en toutes positions (i.e. vitesse identique à la même profondeur en tous points du plan X-Y), il serait possible de précalculer une matrice de correction Profondeur vs « Distance horizontale parcourue » de deltas verticaux.

Pour améliorer la fiabilité des mesures de distance, il serait possible de prendre en compte la vitesse actuelle du sous-marin en recréant le triangle de réception que forme la différence de

position entre le moment de l'émission de l'onde et la réception de l'écho. Cela nous donnerait une distance de trajet différente d'un aller-retour de parcours identique (voir figure 82).

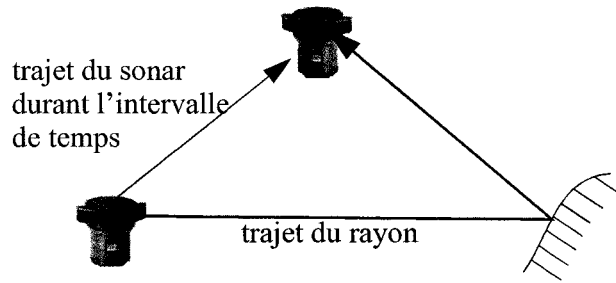


Figure 82 : distance de mesure réelle lors d'une vitesse non-négligeable du sonar

Simulation acoustique

- a. Le module de simulation acoustique n'utilise que la composante verticale (rotation autour de l'axe Z) de l'orientation du sous-marin virtuel pour diriger le point de départ des rayons, ce qui donne nécessairement des scans compatibles avec la méthode de connectivité simple. Pour une simulation plus proche de la réalité, il serait préférable de prendre en compte l'orientation complète du véhicule.

Considérant les limitations actuelles du système de simulation 3D en matière de calcul de propagation acoustique par méthode de collisions rectilignes uniquement, il est difficile de générer des valeurs réalistes à moyenne et longue portées. Une architecture logicielle plus compétente du poste d'entraînement séparerait les fonctions graphiques et les trajectoires sonar en deux modules distincts, et idéalement en deux ordinateurs différents également, afin de leur permettre de se concentrer sur leur type de calcul spécifique. Cette séparation permettrait surtout au simulateur sonar de pouvoir profiter pleinement de la puissance de son processeur « dédié » afin de générer des profils complets, sur 128 rayons, à chaque scan simulé.

Cette plus grande capacité de calcul permettrait également de simuler de façon plus correcte les rayons acoustiques en utilisant la technique de la super-résolution. Afin de mieux simuler le comportement réel d'un capteur, il faudrait lancer plusieurs sous-rayons avec des angles de départ légèrement différents et moyenner le résultat de chacune des 128 directions. Ceci permettrait de couvrir véritablement les $1,5^\circ$ de cône de réception transversale.

Filtrage des données sonar brutes

La méthode utilisée pour modifier la variance du filtre gaussien adaptatif σ^2 est très efficace à l'intérieur d'un profil. Par contre, sa formulation la rend dépendante du niveau de bruit de surface. Afin de rendre le lissage par gaussien adaptatif insensible à la quantité de bruit de surface dans les profils, la variante suivante pourrait être utilisée :

$$\sigma^2 = e^{\left(\frac{G^2(x)}{K\sigma_e^2} \right)} \quad (5.4)$$

L'ajout de cette variance estimée locale σ_e^2 au moment du filtrage permettrait de limiter la réduction du lissage causée par l'augmentation du bruit.

Il existe d'autres méthodes de lissage de courbe qui ne soit pas basées sur l'application d'une convolution ou par filtrage local des données. Une autre façon de réduire le bruit de surface pourrait être de lisser le profil par une interpolation à l'aide d'une courbe polynomiale d'ordre inférieur au nombre de points et représentant tout le profil (Lancaster [62]). Plusieurs de ces courbes mathématiques existent, mais la plus populaire est la spline cubique parce qu'elle permet d'associer un poids à chaque donnée et ainsi éliminer l'influence des « données 0 ». L'utilisation de cette méthode requiert l'usage d'un solveur d'équation matricielle complexe à mettre en place. Par contre, il est possible de réduire la complexité d'un tel opérateur. En effet, le système d'équations, de type tridiagonale, permet d'utiliser une adaptation de la décomposition de Cholesky (voir Heckbert [63]).

Également, la restauration de signal par méthode de déconvolution seraient d'autres voies à explorer pour mettre en place le filtrage du bruit de surface.

Reconstruction de surfaces

Dans la méthode de connectivité simple, le calcul du décalage latéral entre les profils consécutifs ne mesure les distances qu'à un seul point du profil courant. En théorie, ce point de comparaison unique est suffisant, mais il n'est pas garanti que le point de référence choisi soit un candidat pleinement représentatif du profil. Il pourrait être un reste de filtrage impulsif incomplet, ou se situer aux abords d'une discontinuité, ce qui fausserait les calculs de distances, etc. C'est pourquoi il serait plus juste de faire ce calcul de distance de voisinage à partir de plusieurs endroits du profil courant et vérifier si toutes les valeurs d'index s'accordent.

Dans la méthode de connectivité par projection 2D, le regroupement en section de profils s'intersectant ou pas est faite actuellement dans l'ordre d'arrivée de ceux-ci. Cette façon de faire implique qu'un scan obtenu après rotation du sonar ne fait pas l'objet de vérification au-delà de son précédent et de ses suivants. Il serait probablement mieux de vérifier l'occurrence de croisements dans les deux sens de la liste des profils afin de regrouper correctement tout ceux impliqués, plutôt que de laisser non-résolue cette superposition de géométrie jusqu'à l'étape d'unification.

Le logiciel E3D a été conçu, jusqu'à maintenant, pour utiliser les services d'un visualisateur de fichier VRML nommé Cortona^{MC} de ParallelGraphics. Ce composant permet d'afficher en 3D le contenu des fichiers désirés et c'est de cette façon que les descriptions des surfaces reconstruites sont ajoutées lors de leur création.

Cortona permet également de visualiser un fichier VRML de façon autonome en s'intégrant au client HTML Internet Explorer de Microsoft. Durant cet affichage individuel, les surfa-

ces présentes ont tout intérêt à montrer pleinement leur présence par une opacité complète, et c'est pourquoi le fichier généré utilise la valeur maximale. Par contre, lorsqu'elles sont visualisées à l'intérieur de E3D, elles sont en présence de la géométrie de référence et une certaine transparence aiderait à percevoir les différences entre les deux. Il serait donc utile que E3D puisse imposer un facteur moindre durant la lecture du fichier.

Pour l'instant, l'interface usager E3D du poste de commande ne fait qu'afficher les surfaces reconstruites au fur et à mesure de leur création. Éventuellement, E3D pourrait probablement servir à manipuler ces géométries. Dans cette optique, il serait utile d'afficher une liste dynamique des fichiers actuellement en mémoire, en plus de la géométrie de référence, et d'introduire le concept de « surface sélectionnée ». Afin de rendre cette sélection courante évidente, autant dans la partie 3D, une mise en sur-brillance par un changement temporaire de couleur de la surface pourrait être utilisée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Kongsberg Simrad Mesothech . <http://www.kongsberg.com>
- [2] Urick , R.J. (1983). *Principles of underwater sound* (3e éd.). Peninsula Publication.
- [3] Etter Paul C. (1996). *Underwater acoustic modeling - Principles, techniques and applications* (2e éd.). Brunner-Routledge.
- [4] Etter Paul C. (2001). Recent advances in underwater acoustic modelling and simulation. *Jour. of sound and vibration*, 240(2), 351-383.
- [5] Etter Paul C. (2003). *Underwater acoustic modeling and simulation* (3e éd.). Spon Press.
- [6] Wong G.S.K., Zhu S.M.(1995). Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature and pressure. *Jour. of acoustic society of america*, 97(3).
- [7] Chen C.T., Millero F.J. (1977). Speed of sound in seawater at high pressure. *Jour. of Acousticl society of America*, 62, 1129-1135.
- [8] Ziomek L.J., Polnicky F. (1993). The RRA algorithm: Recursive Ray Acoustics for three-dimensional speeds of sound. *IEEE Jour. of Oceanic engineering*, 18(1), p. 25-30.
- [9] Brutzman D.P. (1997). *A virtual world for an autonomous underwater vehicle*. Dissertation de maitrise au Naval Postgraduate School.
- [10] Ziomek L.J. (1985). *Underwater acoustics, a linear systems theory approach*. Academic Press.
- [11] DesertStar . *Aquamap ROV*, [en ligne]. <http://www.desertstar.com/newsite/positioning/selector/index.html> (consulté le 4 juin 2004).
- [12] Blain M., Lemieux S., Houde R. (2003). Implementation of a ROV Navigation System Using Acoustic/Doppler Sensors and Kalman Filtering. *Proc. of the IEEE OCEANS '03 Conf.*, 3 , 1255-1260.

- [13] Mehra R., Seereeram S., Bayard D., Hadaegh F. (1995) Adaptive Kalman filtering, failure detection and identification for spacecraft attitude estimation, *4th IEEE Conf. on Control applications*, 176-181.
- [14] Magill D.T. (1965) Optimal adaptive estimation of sampled stochastic processes, *IEEE Trans. on automatic control*, AC-10(4), 434-439.
- [15] Murino V., Trucco A. (1994). Acoustic image improvement by confidence levels. *Proc. of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 1367-1370
- [16] Murino V., Frumento E., Gabino F., Trucco A. (1995). A markov random field approach for restoration of underwater acoustic images. *Proc. of the IEEE OCEANS '95 Conf.*, 3, 1900-1906.
- [17] Murino V., Trucco A., Regazzoni C.S. (1998). A probabilistic approach to the coupled reconstruction and restoration of underwater acoustic images. *IEEE Transac. on pattern analysis and machine intelligence*, 20(1), 9-22.
- [18] Mann M., Agathoklis P., Antoniou A. (2001). Automatic outlier detection in multi-beam data using median filtering. *IEEE Pacific Rim Conf. on Communications, Computers and signal Processing*, 2, 690-693
- [19] Evans A.N., Nixon M.S. (1993). Speckle filtering in ultrasound images for feature extraction. *IEEE Conf. on Acoustic sensing and imaging*, 44-49.
- [20] Bisquay H., Freulon X., de Fouquet C., Lajeunie C. (1998). Multibeam data cleaning for hydrography using geostatistics. *Proc. of the IEEE OCEANS '98 Conf.*, 2, 1135-1143.
- [21] Acton S.T. (1998). Anisotropic diffusion and local monotonicity. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal processing*, 3, 1293-1296.
- [22] Acton S.T. (2000). Locally monotonic diffusion. *IEEE Transac. on Signal processing*, 48(5), 1379-1389.
- [23] Schistad A., Taxt T. (1992). Speckle reduction in ultrasound images using temporal and spatial context. *Conf. Record of the IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conf.*, 3, 2210-2214.

- [24] Evans A.N., Nixon M.S. (1995). Mode filtering to reduce ultrasound speckle for feature extraction. *Proc. of the IEEE Conf. on Visual images signal processing*, 142(2), 87-94.
- [25] Morales A., Boman E., Ko S.J. (2002). An efficient algorithm to calculate sample and rank selection probabilities for weighted median filters. *IEEE Signal Processing Letters*, 9(5), 148-150.
- [26] Bangham J.A., Cheung K.Y. (1990). Processing Sidescan Data Using Statistical Filtering. *Proc. of the IEEE OCEANS '90 Conf.*, 57-62.
- [27] Zaman M.R., Moloney C.R. (1993). A comparison of adaptive filters for edge-preserving smoothing of speckle noise. *IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal processing*, 5, 77-80.
- [28] Acton S.T., Yu Y. (2002). Speckle reducing anisotropic diffusion. *IEEE Transac. on Image Processing*, 11(11), 1260-1270.
- [29] Okino M., Higashi Y. (1986). Measurement of seabed topography by multibeam sonar using CFFT. *IEEE Jour. of oceanic engineering*, 11(4), 474-479.
- [30] Bernardini R., Cortelazzo G.M. (2000). A post-processing technique for noise removal of range data. *IEEE Transac. on Circuits and Systems for Video Technology*, 10(2), 201-206.
- [31] Hodson E.K., Thayer D.R., Franklin C. (1981) Adaptive gaussian filtering and local frequency estimates using local curvature analysis. *IEEE Trans. on acoust., speech, and signal processing*, vol 29, 854-829.
- [32] Cornsweet T.N., Yellot J.I. Jr (1985) Intensity-dependant spatial summation. *Journal of Optical society of America*. Part A, vol 2, 1769-1786.
- [33] Vaezi M., Bavarian B (1990) Contrast-dependant spread filters. *Proc. of the SPIE : Image processing algorithmes and techniques*. vol 1244, 100-107.
- [34] Deng G., Cahill L.W. (1993). An adaptive Gaussian filter for noise reduction and edge detection. *IEEE Conf. record of the Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference*, 3, 1615-1619.

- [35] Lim J.S. *Two-Dimensional Signal and Image Processing*. 536-540.
- [36] Hilton A. (1995). *On reliable surface reconstruction from multiple range images*. Technical Report VSSP-TR-5/95. Department of Electronic & Electrical Engineering from the University of Surrey, Grande-Bretagne.
- [37] Yokoya N., Levine M.D. (1989). Range image segmentation based on differential geometry: an hybrid approach. *IEEE Transac. on Pattern analysis and machine intelligence*, 11(6), 643-649.
- [38] Pham T., Wagner M. (1999) Filtering noisy images using kriging. *Fifth Int. symposium on signal processing and its applications ISSPA '99*. 427-430
- [39] Hoppe H., Duchamp T., Pulli K., Shapiro L., McDonald J., Stuetzle W. (1997). Robust meshes from multiple range maps. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Recent Advances in 3D Digital Imaging and Modeling*, 205-211.
- [40] Curless B., Levoy M. (1996). A volumetric method for building complex models from range images. *SIGGRAPH 96*, 303-312.
- [41] Chen Y., Medioni G. (1994) Fitting a surface to 3-D points using an inflating balloon model. *Proc. of the Second IEEE CAD-Based Vision Workshop*, 266- 273.
- [42] Medioni G., Chia-Wei L. (1995). Surface approximation of complex multipart objects. *Proc. of the IEEE Workshop on Physics-Based Modeling in Computer Vision*, p. 2.
- [43] Hilton A., Gonçalves J.G.M. (1994). *3D Scene Representation using a deformable Surface*. University of Surrey, Guildford.
- [44] Hoppe h., DeRose T., Duchamp T., McDonald J., Stuetzle W. (1992) Surface reconstruction from unorganized points. *Computer Graphics*, 26(2), juillet 1992.

Permission to copy without fee all or part of this material is granted provided that the copies are not made or distributed for direct commercial advantage, the ACM copyright notice and the title of the publication and its date appear, and notice is given that copying is by permission of the Association for Computing Machinery. To copy otherwise, or republish, requires a fee and/or specific permission.

- [45] Fua P., Sander P. (1992). Reconstructiong surfaces from unstructured 3D points. *Image understanding Workshop*, 615-625.
- [46] Ronghua L., Chun C., Zhigeng J. (2002). Surface modeling from 3D unorganized points. *Proc. of the IEEE Region 10 conf. on computers, communications, control and power engineering*, vol.1, p. 236-239
- [47] Sibson R. (1978). Locally equiangular triangulation. *Computer Journal*, 21, 243-245.
- [48] Chen Y., Medioni G. (1991). Object modeling by registration of multiple range images. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2724-2729.
- [49] Potmesil M. (1983). Generating models of solid objects by matching 3D surface segments. *Proc. of the 8th IJCAI*, 1089-1093.
- [50] Vemuri B.C., Aggarwal J.K. (1986). 3D model construction from multiple views using range and intesity data. *Proc. of the IEEE Conf. on CVPR*, 435-438.
- [51] Amenta N., Choi S., Dey T., Leekha N. (2000). A simple algorithm for homeomorphic surface reconstruction. *ACM Symp. on Computational Geometry*, 213-222.
- [52] Dey T.K., Giesen J., Hudson J. (2001). Delaunay based reconstruction from large data. *Proc. of the IEEE Symp. on Parallel and Large-Data Visualization and Graphics*, 19-146.
- [53] Soucy M., Laurendeau D. (1995). A general surface approach to the integration of a set of range views. *IEEE Transac. on Pattern analysis and machine intelligence*, 17(4), 344-358.
- [54] Wyvill G., McPheeters C., Wyvill B. (1986) Data structures for soft objects. *The visual computer*, vol. 2(4), p. 227-234.
- [55] Hilton A., Stoddart A., Illingworth J., Windeatt T. (1996). Marching triangles: range image fusion for complex object modelling. *International conf. on image processing*, vol. 1, p. 381-384

- [56] Soucy M, Godin G, Baribeau R., Blais F., Rious M. (1996b). Sensors and algorithms for the construction of digital 3-D colour models of real objects. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Image Processing*, 1 et 2, 409-412.
- [57] Hilton A., Stoddart A., Illingworth J., Windeatt T. (1996). Reliable surface reconstruction from multiple range images. *Fourth International European conference on computer vision*, Cambridge, UK, vol 1, p.117-126.
- [58] Hilton A., Stoddart A., Illingworth J., Windeatt T. (1998). Implicit surface-based geometric fusion. *Computer vision and understanding*, vol 69, no 3, p.273-291.
- [59] Besl P. J., McKay N.D. (1992) A method of registration of 3D shapes. *IEEE trans. on pattern analysis and machine intelligence*. vol 14(2), p. 239-256.
- [60] Gagnon H. Soucy M., Bergevin R., Laurendeau D. (1994). Registration of multiple range views for automatic 3D model building. *Proc. of the IEEE conf. on CPVPR*, p.581-586.
- [61] Fournier M. (2002). *Fusion de données provenant d'un profilomètre tenu à la main*. Mémoire de maîtrise à l'École de technologie supérieure.
- [62] Lancaster P., Salkauskas K. (1986) *Curve and surface fitting, an introduction*. Academic Press.
- [63] Heckbert P.S. (1994) *Graphics gems IV*. Academic Press.